

Note: Cette traduction a été établie par le Greffe à des fins internes et n'a aucun caractère officiel

COUR INTERNATIONALE DE JUSTICE

**AFFAIRE RELATIVE À LA CONSTRUCTION D'UNE ROUTE AU COSTA RICA
LE LONG DU FLEUVE SAN JUAN**

(NICARAGUA c. COSTA RICA)

DUPLIQUE DÉPOSÉE PAR LE COSTA RICA

VOLUME III

Annexes 4 à 14

2 FÉVRIER 2015

[Traduction du Greffe]

LISTE DES ANNEXES

VOLUME II

ANNEXE	DOCUMENT	PAGE
4.	University of Costa Rica, Centre for Research in Sustainable Development, Department of Civil Engineering, Second Report on Systematic Field monitoring of Erosion and Sediment Yield along Route 1856, November 2014	1
5.	Régie costa-ricienne d'électricité (<i>Instituto costarricense de Electricidad, ICE</i>), projets d'exploitation stratégique et services associés, centre d'études fondamentales en ingénierie, service de l'hydrologie, «Second rapport sur l'hydrologie et les sédiments des bassins hydrographiques costa-riciens dont les eaux sont drainées par le fleuve San Juan», décembre 2014	2
6.	Bernald Pacheco Chaves, «Analyse du rapport «Répercussions écologiques de la route 1856 sur le fleuve San Juan, Nicaragua» de juillet 2014 (Ríos Touma 2014) et réponse», octobre 2014	60
7.	Arturo Angulo Sibaja, «Diagnostic de l'impact sur l'environnement, ichtyofaune du fleuve San Juan», analyse documentaire, novembre 2014	64
8.	Pablo E. Gutiérrez Fonseca, <i>Critical statistical analysis of the report «Ecological Impacts of the Route 1856 on the San Juan River, Nicaragua»</i> by Blanca Ríos Touma, November 2014	69
9.	Juan Carlos Fallas Sojo, «Observations sur le rapport de M. Kondolf en ce qu'il a trait aux ouragans et tempêtes tropicales», 2014	70
10.	Allan Astorga Gättgens, «Apports sédimentaires extraordinaires causés par des phénomènes exceptionnels dans le fleuve San Juan», décembre 2014	74
11.	Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), <i>Works on National Road 856 : Before and After</i> , December 2014	88
12.	Comisión de Desarrollo Forestal de San Carlos (CODEFORSA), <i>Restoration and rehabilitation of ecosystems affected by the construction of the Juan Rafael Mora Porras border road, Route 1856</i> . Quaterly Report, November 2014	88
13.	Comisión de Desarrollo Forestal de San Carlos (CODEFORSA), <i>Consulting Services for the Development and Implementation of an Environmental Plan for the Juan Rafael Mora Porras Border Road</i> , Report of Contract SINAC-CDE-004-2012, November 2014	88
14.	Centro Científico Tropical (CCT), <i>Follow-up and Monitoring Study Route 1856 Project- EDA Ecological Component</i> , January 2015	88

ANNEXE 4

**UNIVERSITY OF COSTA RICA, CENTRE FOR RESEARCH IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT,
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SECOND REPORT ON SYSTEMATIC FIELD
MONITORING OF EROSION AND SEDIMENT YIELD ALONG ROUTE 1856,
NOVEMBER 2014**

[Annexe non traduite]

ANNEXE 5

RÉGIE COSTA-RICIENNE D'ÉLECTRICITÉ (INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD, ICE), PROJETS D'EXPLOITATION STRATÉGIQUE ET SERVICES ASSOCIÉS, CENTRE D'ÉTUDES FONDAMENTALES EN INGÉNIERIE, SERVICE DE L'HYDROLOGIE, «SECOND RAPPORT SUR L'HYDROLOGIE ET LES SÉDIMENTS DES BASSINS HYDROGRAPHIQUES COSTA-RICIENS DONT LES EAUX SONT DRAINÉES PAR LE FLEUVE SAN JUAN», DÉCEMBRE 2014

San José, Costa Rica

Préparé par :

Juan José Leitón Montero
David Jiménez González

Avec la collaboration de :

José Alberto Zúñiga Mora, directeur du Centre d'études fondamentales en ingénierie
Jorge Granados Calderón, directeur du service de l'hydrologie
Marcelo Avendaño Castro et l'unité URM
José Pablo Cantillano et l'unité UPH
Berny Fallas López et les unités UPM-UAH
Paola Sánchez Arguedas et l'unité ULQ

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction
2. Zone d'étude
3. Informations de base
 - 3.1. Données météorologiques
 - 3.2. Données hydrologiques
 - 3.3. Données sédimentologiques
 - 3.4. Données spatiales
4. Charge en suspension
5. Transport de la charge de fond dans le fleuve Colorado
6. Estimation de la charge solide à l'embouchure du Sarapiquí et du fleuve San Carlos, et dans le fleuve San Juan
7. Modèle d'érosion du sol
 - 7.1. Données d'entrée
 - 7.2. Erosion potentielle sur la base du modèle USLE et de l'analyse d'incertitude
 - 7.3. Méthode d'étalonnage
 - 7.4. Apport sédimentaire
8. Bilan sédimentaire
9. Références
10. Appendice

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 2.1.	Principaux bassins dont les eaux sont drainées directement par le fleuve San Juan	9
Tableau 3.1.	Caractéristiques des stations de jaugeage météorologiques situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan.....	10
Tableau 3.2.	Caractéristiques des stations de jaugeage hydrologiques situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan.....	12
Tableau 3.3.	Caractéristiques des stations de jaugeage hydrologiques situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan.....	12
Tableau 3.4.	Mesures du débit de l'écoulement dans les stations de jaugeage hydrologiques et sédimentologiques situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan	13
Tableau 3.5.	Caractéristiques des stations de jaugeage de sédiments en suspension situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan.....	14
Tableau 3.6.	Caractéristiques des stations de jaugeage de courbe granulométrique situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan.....	14
Tableau 4.1.	Production de sédiments en suspension observée dans les stations de jaugeage	19
Tableau 4.2.	Intervalles de confiance en tant qu'anomalies normalisées pour la production de sédiments en suspension observée dans les stations de jaugeage.....	20
Tableau 4.3.	Apport sédimentaire spécifique observé dans les stations de jaugeage	20
Tableau 5.1.	Pente décrite dans Andrews (2014) et pente calculée selon la méthode d'Engelund-Hansen présentée dans García (2007)	22
Tableau 5.2.	Production de sédiments de fond à la station de Delta Colorado (11-04).....	23
Tableau 6.1.	Zone de drainage, valeur moyenne du débit, coefficients de variation horaire et quotidien, et charge solide annuelle moyenne pour les fleuves Sarapiquí et San Carlos	27
Tableau 6.2.	Charges solides dans le fleuve San Juan en fonction de différents pourcentages de débit s'écoulant dans le fleuve Colorado.....	28
Tableau 6.3.	Charges solides dans le cours inférieur du San Juan en fonction de différents pourcentages de débit s'écoulant dans le fleuve Colorado	29
Tableau 7.1.	Types de couverture observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan et superficie correspondante pour chaque unité géographique	30
Tableau 7.2.	Types de couverture observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan et descripteurs de tendance centrale, valeurs limites et coefficient de variation du facteur de couverture C de l'USLE (selon différentes distributions de densité de probabilité)	31
Tableau 7.3.	Types de sol observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan et zone correspondante pour chaque unité géographique	33
Tableau 7.4.	Types de sol observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan et facteur d'érodibilité moyen, intermédiaire, maximum et minimum correspondants, avec le coefficient de variation associé, compte tenu de différentes distributions de densité de probabilité.....	34
Tableau 7.5.	Estimations de l'érosion potentielle sur la base de méthodes de modèles agrégés et distribués	39
Tableau 7.6.	Méthode d'étalonnage pour la production de sédiments en suspension	43

Tableau 7.7.	Erosion potentielle du sol et apport sédimentaire pour les principaux bassins dont les eaux sont drainées directement par le fleuve San Juan.....	44
Tableau 8.1.	Taux d'érosion pour la plate-forme de la route.....	45
Tableau 8.2.	Incréments de la charge solide, par bassin, dus à la construction de la route 1856	45
Tableau 8.3.	Incréments de la charge solide, par portion, dus à la construction de la route 1856	46
Tableau 8.4.	Bilan sédimentaire ajusté pour le réseau du bassin du fleuve San Juan.....	47
Tableau 8.5.	Séparation de la charge en suspension et de la charge de fond des incréments de charges solides découlant de la construction de la route 1856, au niveau du delta pour différents pourcentages supposés de matériaux grossiers présents dans les matériaux de la route 1856 (en masse).....	49
Tableau 8.6.	Séparation de la charge en suspension et de la charge de fond des incréments de charges solides découlant de la construction de la route 1856, au niveau du delta, pour différents pourcentages supposés de matériaux grossiers présents dans les matériaux de la route 1856 (en volume).....	49

INDEX DES FIGURES

Figure 2.1.	Système du bassin du fleuve San Juan	8
Figure 2.2.	Zone d'étude.....	9
Figure 3.1.	Stations de jaugeage hydrologiques situées dans les bassins costa-riciens dont les eaux s'écoulent dans le fleuve San Juan	11
Figure 3.2.	Modèle numérique d'élévation hydrologiquement correct de la zone d'étude.....	15
Figure 3.3.	Carte de la couverture du sol de la zone d'étude.....	16
Figure 3.4.	Carte taxonomique des sols de la zone d'étude.....	16
Figure 3.5.	Champ de précipitations annuelles moyennes pour l'ensemble de la zone d'étude.....	17
Figure 4.1.	Comparaison des concentrations moyennes simples et des concentrations moyennes pondérées du débit pour les fleuves Colorado (11-04), Sarapiquí (BSa) et San Carlos (BSC)	18
Figure 4.2.	Courbe de tarage de la charge des sédiments en suspension à la station de jaugeage Delta Colorado (11-04)	18
Figure 4.3.	Apport sédimentaire spécifique observé dans les stations de jaugeage.....	21
Figure 5.1.	Courbe de tarage de la charge de fond à la station de jaugeage Delta Colorado (11-04)	22
Figure 6.1.	Courbe des débits classés horaire empirique (basée sur les séries temporelles) et théorique (basée sur la distribution des probabilités) pour la station de Delta Colorado (11-04)	24
Figure 6.2.	Coefficient d'efficacité de Nash Sutcliffe entre la courbe des valeurs classées modélisée et la courbe des valeurs classées obtenue sur la base des séries temporelles de débit.....	25
Figure 6.3.	Charge en suspension et charge de fond, sur la base des courbes de valeurs classées modélisées et de la méthode des séries temporelles de débit.....	25

Figure 6.4.	Coefficient de variation horaire et quotidien, en fonction de la zone de drainage du bassin, sur la base de six stations de jaugeage situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan (pente costa-ricienne)	26
Figure 6.5.	Répartition des charges moyennes annuelles de sédiments en suspension et de fond dans le fleuve San Juan dans l'hypothèse où le pourcentage de débit s'écoulant dans le fleuve Colorado est égal à a) 95, b) 90 et c) 85 %.....	28
Figure 6.6.	Charges moyennes annuelles de sédiments en suspension dans le fleuve Colorado et le cours inférieur du fleuve San Juan, en pourcentage de la charge annuelle moyenne de sédiments en suspension dans le fleuve San Juan, dans l'hypothèse où le pourcentage de débit s'écoulant dans le fleuve Colorado est égal à a) 95, b) 90 et c) 85 %.....	29
Figure 6.7.	Charges annuelles moyennes des sédiments de fond dans le fleuve Colorado et le cours inférieur du fleuve San Juan, en pourcentage de la charge annuelle moyenne de sédiments de fond du fleuve San Juan, dans l'hypothèse où le débit s'écoulant dans le fleuve Colorado est égal à a) 95, b) 90 et c) 85 %	30
Figure 7.1.	Comparaison du coefficient de variation du facteur C dans l'hypothèse de différentes distributions de densité de probabilité.....	32
Figure 7.2.	Facteur C pour la zone d'étude.....	33
Figure 7.3.	Comparaison du coefficient de variation de l'érodibilité dans l'hypothèse de différentes distributions de densité de probabilité.....	35
Figure 7.4.	Facteur K dans la zone d'étude.....	35
Figure 7.5.	Facteur R en fonction des précipitations annuelles moyennes pour la zone d'étude	36
Figure 7.6.	Facteur R dans la zone d'étude.....	37
Figure 7.7.	Facteur LS dans la zone d'étude.....	37
Figure 7.8.	Erosion potentielle dans la zone d'étude	38
Figure 7.9.	Indice de dépôt dans la zone d'étude.....	41
Figure 7.10.	Distributions de densité de l'érosion potentielle empirique en fonction de l'indice de dépôt pour la zone d'étude.....	42
Figure 7.11.	Fonction de dépôt étalonnée pour la somme pondérée minimale des erreurs quadratiques.....	42
Figure 7.12.	Comparaison des apports de sédiments en suspension modélisés (ASSM) et observés (ASSO)	43
Figure 7.13.	Apport sédimentaire dans la zone d'étude.....	44
Figure 8.1.	Incréments de la charge solide, par bassin, dus à la construction de la route 1856.....	46
Figure 8.2.	Incréments de la charge solide, par portion, dus à la construction de la route 1856.....	46
Figure 8.3.	Bilan sédimentaire du bassin du fleuve San Juan (valeurs en t/an).....	48
Figure 8.4.	Ratio du transport sédimentaire total entre le fleuve Colorado et le cours inférieur du fleuve San Juan en fonction du pourcentage supposé d'apport sédimentaire de la route 1856 constitué de matériaux (de sable) grossiers	50

Figure 8.5.	Incrément de la charge annuelle moyenne de sédiments en suspension du fleuve San Juan dû à la construction de la route 1856 dans l'hypothèse d'une fraction de matériaux grossiers égale à 5 % (les valeurs entre parenthèses correspondent à 10 %).....	50
Figure 10.1.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Delta Colorado (11-04).....	52
Figure 10.2.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Puerto Viejo (12-03).....	52
Figure 10.3.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Veracruz (12-04)	53
Figure 10.4.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Toro (12-06)	53
Figure 10.5.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage San Miguel (12-11).....	54
Figure 10.6.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Río Segundo (12-13)	54
Figure 10.7.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Jabillos (14-02).....	54
Figure 10.8.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Terrón Colorado (14-04)	55
Figure 10.9.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Peñas Blancas (14-05)	56
Figure 10.10.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Pocosol (14-20)	56
Figure 10.11.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Guatuso (16-02).....	57
Figure 10.12.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Santa Lucía (16-05)	57
Figure 10.13.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de mesurage des sédiments San Carlos (BSC)	58
Figure 10.14.	Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de mesurage des sédiments Sarapiquí (BSa)	58
Figure 10.15.	Courbe de tarage des sédiments du fond pour la station de mesurage des sédiments Sarapiquí (BSa)	59
Figure 10.16.	Courbe de tarage des sédiments du fond pour la station de mesurage des sédiments San Carlos (BSC)	59

1. INTRODUCTION

Le présent rapport a été élaboré à la demande de M. Luis Guillermo Solís Rivera, président de la République du Costa Rica, et de M. Manuel Antonio González Sanz, ministre des affaires étrangères de la République du Costa Rica. Il vise à fournir des informations concernant les processus liés aux sédiments dans le fleuve San Juan.

Contexte

La régie costa-ricienne d'électricité (*Instituto costarricense de Electricidad*, ICE) est un institut national dédié à l'identification, la conception, le développement et l'exploitation de projets d'électricité et de télécommunication. Depuis la fondation de l'institut en 1949, la division Electricité se consacre à la réalisation de mesures et d'études hydrologiques et sédimentologiques.

Plusieurs grands bassins dont les eaux sont drainées par le fleuve San Juan font l'objet d'une surveillance de la part de l'ICE en raison de leur potentiel hydrologique. Ces bassins fournissent des informations en matière de sédiments, de précipitations et de débits, pour des périodes allant de plusieurs années à plusieurs décennies.

A partir de l'expertise technique et des informations disponibles, un «rapport sur l'hydrologie et les sédiments pour les bassins hydrographiques costa-riciens dont les eaux sont drainées par le fleuve San Juan» a été rédigé en 2013. Nombre des thèmes traités dans ce dernier rapport font ici l'objet d'une nouvelle analyse, d'une redéfinition et d'une explication.

Le rapport actuel

Le rapport actuel vise à décrire les processus liés aux sédiments dans le fleuve San Juan, en mettant l'accent sur le bilan sédimentaire et son calcul. Il présente une approche du phénomène de transport sédimentaire qui diffère du rapport précédent, en ce qu'il se fonde sur un paradigme non pas déterministe classique mais stochastique et plus réaliste, ainsi que sur une meilleure compréhension du phénomène de transport sédimentaire proprement-dit, grâce à la mise en œuvre de différentes relations théoriques et de nouvelles méthodologies. En conséquence, les résultats devraient diverger de ceux du rapport précédent.

Le premier chapitre présente une description des aspects généraux de la zone d'étude, suivie d'une brève description des informations météorologiques, hydrologiques, sédimentologiques et spatiales utilisées dans le cadre de cette étude au second chapitre. Il est essentiel de souligner que la plupart des informations spatiales ont été améliorées en termes de densité des données et de congruences météorologiques et hydrologiques. En outre, la période de mesures a été prolongée de plus d'un an pour toutes les stations de jaugeage en service à ce jour.

Le troisième chapitre présente la production de sédiments en suspension pour toutes les stations sédimentologiques. Les intervalles d'incertitude correspondants pour les courbes de tarage des sédiments en suspension et le temps ont été calculés. Dans le sixième chapitre, cette analyse d'incertitude est utilisée lors du processus d'étalonnage.

L'application de la formule d'Engelund-Hansen a entraîné une amélioration de la méthode de calcul de la charge de fond. Les résultats en découlant ont permis de calculer la production des sédiments de fond avec ses intervalles de confiance présentés au quatrième chapitre.

Pour augmenter la densité des informations concernant la partie inférieure du système hydrologique, la production sédimentaire à Boca San Carlos et Boca Sarapiquí a été évaluée au moyen de la courbe des débits classés modélisée de manière probabiliste, mentionnée dans Krasovskaia & Gottschalk (2014), et la méthode de la courbe des sédiments classés proposée par Garcia (2014).

Un modèle d'érosion des sols a été utilisé pour l'élaboration d'un modèle de distribution spatiale des sédiments pour le bassin du fleuve San Juan confiné dans la zone d'étude. La méthodologie appliquée se fonde essentiellement sur le modèle CALSITE (Bradbury, 1995). Des améliorations ont été faites, telles que l'accroissement de la résolution spatiale des pixels, l'analyse de l'ensemble de l'impluvium en tant qu'unité de congruence hydrologique, l'étalonnage pondéré de l'incertitude, et la mise en œuvre de différentes fonctions de ratio de dépôt.

Il convient de noter qu'une analyse d'incertitude a également été effectuée pour le modèle USLE. Ceci implique que la distribution spatiale des sédiments présente une incertitude inhérente, tout comme les éléments du bilan non mesurés.

Une fois le modèle de distribution élaboré, le bilan sédimentaire a été effectué sur la base des principaux bassins en tant qu'unités de surface. Les résultats des études réalisées par Oreamuno-Vega & Villalobos-Herrera (2014) et Mende (2014) ont été utilisés pour déterminer la production sédimentaire de la route 1856 ajoutée au bilan sédimentaire du fleuve San Juan, et par là-même ses contributions au cours inférieur du fleuve San Juan et au fleuve Colorado.

L'un des éléments essentiels de cette étude — manifeste tout au long de ce rapport — est la variabilité naturelle de la charge solide du fleuve San Juan. Il n'est pas exagéré de dire que la production sédimentaire causée par la route 1856 est, probablement, statistiquement sans conséquence sur la variabilité du comportement des sédiments dans le fleuve San Juan.

2. ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude se situe dans le bassin du fleuve San Juan (figure 2.1) et, plus précisément, englobe uniquement la zone dont les eaux sont drainées directement par le fleuve San Juan avant la dérivation au niveau du delta (région en rouge pâle sur la figure 2.1).

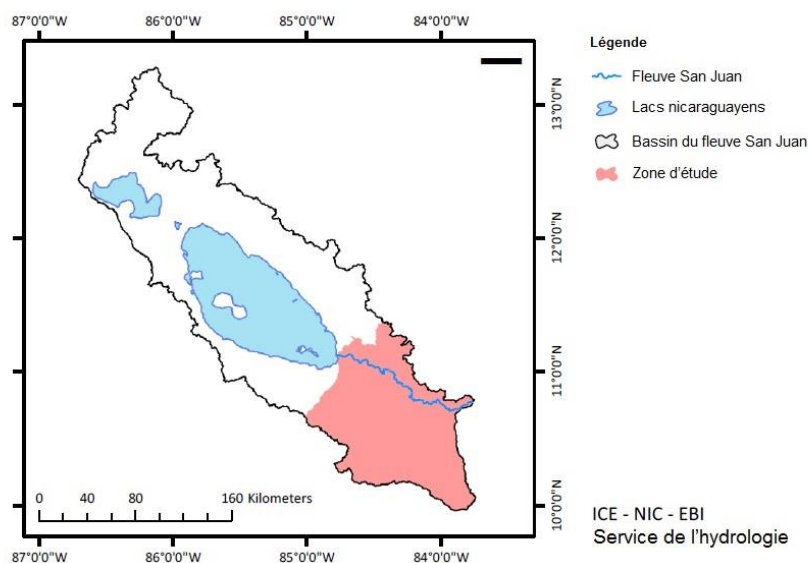


Figure 2.1. Système du bassin du fleuve San Juan

Il est important de noter que le bassin du fleuve San Juan est un système hydrologique de plus de 40 500 km² ; en outre, il comporte deux *tampons hydrologiques* (les lacs) qui dissocient le comportement de la partie supérieure du bassin de sa partie inférieure. Cette situation particulière nous a permis de modéliser la zone d'étude en tant que système distinct comportant une entrée de sédiments unique au niveau du lac.

Cette zone d'étude couvre approximativement 11 474 km², segmentés en 13 unités de drainage représentées sur la figure 2.2. Six d'entre elles se situent sur la pente méridionale nicaraguayenne, tandis que les sept autres se trouvent sur la pente septentrionale costa-ricienne. Enfin, des informations d'ordre général pour chaque bassin, ainsi que pour l'ensemble de la zone d'étude, sont répertoriées dans le tableau 2.1.

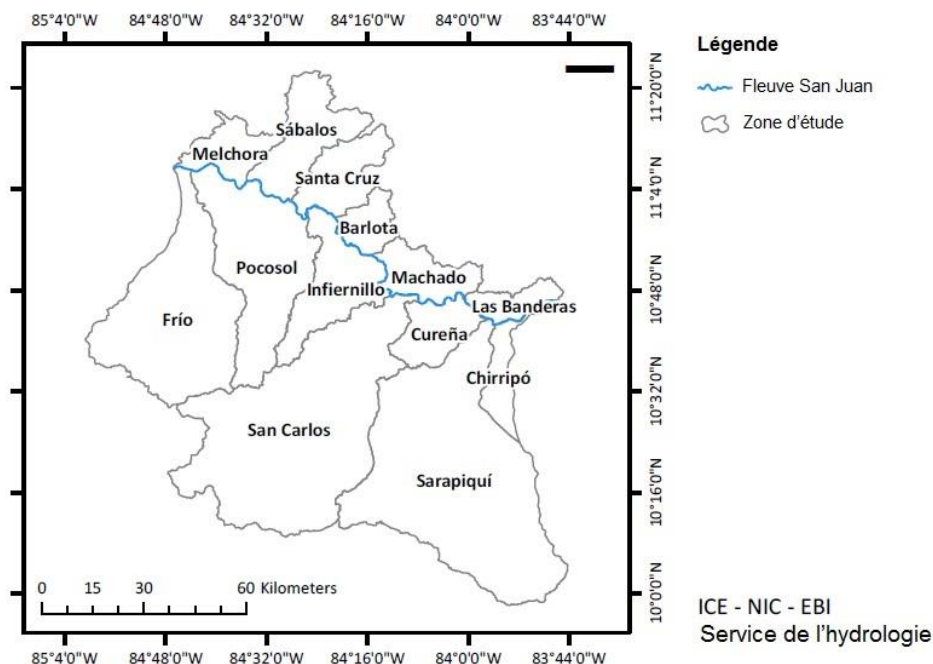


Figure 2.2. Zone d'étude

Tableau 2.1. Principaux bassins dont les eaux sont drainées directement par le fleuve San Juan.

Bassin	Pays	ZD (km ²)	P (km)	A (m.a.n.m.)	Pa (mm/an)
Las Banderas	Nicaragua	198	79,0	52	3953
Machado	Nicaragua	352	110,2	92	3344
Barlota	Nicaragua	219	74,7	142	3050
Santa Cruz	Nicaragua	418	118,8	129	3014
Sábalo	Nicaragua	571	148,0	125	2615
Melchora	Nicaragua	305	108,2	80	1942
San Carlos	Costa Rica	2642	313,5	474	3777
Cureña	Costa Rica	353	93,3	52	3634
Sarapiquí	Costa Rica	2770	280,4	701	4660
Chirripó	Costa Rica	236	118,1	39	3828
Frío	Costa Rica	1577	215,9	189	2758
Pocosol	Costa Rica	1224	212,3	68	2788
Infiernillo	Costa Rica	609	165,8	88	3556
Zone d'étude		11 474	705,5	338	3560

Note : ZD = zone de drainage ; P = périmètre ; A = altitude moyenne ; Pa = précipitations annuelles moyennes

3. INFORMATIONS DE BASE

Ce chapitre décrit les informations météorologiques, hydrologiques et sédimentologiques utilisées comme entrées pour l'élaboration et l'étalonnage du modèle d'érosion.

3.1. Données météorologiques

Le tableau 3.1 répertorie les 52 stations de jaugeage météorologiques de l'ICE examinées dans ce rapport. Plus de 63 810 tempêtes ont été analysées pendant la période 1995-2014 pour estimer le facteur R de l'érodibilité de l'USLE selon la méthodologie de l'indice E130 (Wischmeier & Smith, 1960). Enfin, les totaux des précipitations annuelles moyennes et les valeurs de facteur R ont été utilisés pour dériver une relation empirique du facteur d'érodibilité en fonction des précipitations annuelles moyennes.

Tableau 3.1. Caractéristiques des stations de jaugeage météorologiques situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan

COD	Nom de la station	NTAR USLE	Coordonnées CRTM-05			PE	
			X (m)	Y (m)	Z	DPE	FPE
69505	Vara Blanca	1295	482664	1125351	1773	1996	2014
69507	Colonia Los Angeles	1558	476730	1137081	1026	1999	2014
69520	Aguacate	938	396767	1167718	652	2000	2014
69522	Pueblo Nuevo	1 067	414140	1154413	572	2000	2014
69524	Caño Negro	1727	415438	1149218	785	1995	2014
69530	La Marina	684	458754	1147733	434	2006	2014
69532	Laguna Cote	1295	399677	1169607	679	1999	2014
69544	Guayabos	1083	410359	1155732	613	1999	2014
69547	Pajuila	1370	415692	1160962	783	1999	2014
69548	Jilguero	1909	421499	1154373	600	1996	2014
69549	Dos Bocas	1199	399737	1167140	583	1999	2014
69550	La Union	1007	406603	1162405	557	2000	2014
69551	Guatuso	952	409692	1179373	72	2000	2014
69561	El Sabalo	1420	390511	1171644	935	1995	2014
69563	San Gerardo	1571	411748	1143736	1530	1995	2014
69570	Pastor	1283	417358	1152088	689	1999	2014
69571	Sitio Presa Sangregado	1510	416734	1158476	547	1995	2014
69574	Canalete	533	386324	1198090	98	2006	2014
69576	Bijagua	1164	384826	1186690	451	1999	2014
69578	El Bum	993	500265	1179119	59	2000	2014
69583	Alto Baca Lucía	1243	408793	1164851	778	1999	2014
69587	Pocosol	1439	426992	1144530	750	1999	2014
69588	Isla Bonita	1317	481741	1131555	1165	1999	2014
69596	Chachagua	1190	433813	1151398	319	2000	2014
69598	Santa Lucía	1165	410061	1172486	351	1999	2014
69600	Cerro Zurqui	1768	499839	1113344	1516	1999	2014
69602	Carrillo	1137	505479	1124178	570	1999	2008
69604	La Montura	1597	502920	1118140	1146	1999	2011
69608	Proyecto Venado	1162	418871	1167585	262	1999	2014
69610	Peñas Blancas	996	442741	1156930	80	1999	2014
69612	Alto Palomo	1172	466137	1125544	1986	1997	2014
69614	Bajos del Toro	1056	467318	1129356	1449	1999	2014
69616	Picada de Palmira	1211	462774	1127816	2072	1998	2014
69618	Rio Segundo	1147	466594	1131745	1435	1997	2014

COD	Nom de la station	NTAR USLE	Coordonnées CRTM-05			PE	
			X (m)	Y (m)	Z	DPE	FPE
69620	Quebrada Gata	1376	471100	1134912	1094	2000	2014
69622	Quebrada Pilas	1585	471526	1131014	1596	1996	2014
69624	Rio Desague	1411	471463	1128533	1826	1997	2014
69626	Quebrada Gonzalez	798	506817	1123628	520	2008	2014
69628	Toma De Agua Arenal	640	401496	1164871	532	1999	2014
69632	Nuevo Arenal	871	402192	1166190	624	1999	2014
69634	La Picada de Turrialba	829	523738	1108575	2633	1999	2013
69636	Finca Gavilanes	799	519316	1107279	2111	1999	2014
69638	Chindama	1589	520317	1118862	729	1999	2014
69642	Volcancito	1494	485405	1132750	1372	2000	2014
69646	Audubon	1241	421535	1139979	821	2000	2014
69648	Aleman	1125	418150	1139009	952	2000	2014
69650	Gorrion	1399	467617	1127911	1769	1995	2014
69652	Alto Rio Segundo	1733	464564	1132961	1615	1995	2014
69654	Fila Toro	1404	422861	1135038	1634	2000	2014
69656	S.P. Peñas Blancas	1224	433779	1145779	473	2000	2014
69658	Cota 1600	1342	486235	1130838	1574	2000	2012
69662	Toma Peñas Blancas	797	433825	1146444	333	2001	2014

Note : COD = code de la station ; NTAR USLE = nombre de tempêtes analysées pour les estimations du facteur R de l'USLE ; X = coordonnée Est ; Y = coordonnée Nord ; Z = altitude ; PE = période d'enregistrement ; DPE = début de la période d'enregistrement ; FPE = fin de la période d'enregistrement.

3.2. Données hydrologiques

La figure 3.1 montre l'emplacement des stations de jaugeage de l'ICE, ainsi que les délimitations du bassin et le principal réseau hydrographique. Les tableaux 3.2 et 3.3 indiquent, pour chacune de ces stations, des informations importantes, notamment coordonnées, période durant laquelle ont été effectuées les mesures (échelle horaire et échelle quotidienne), zone de drainage des affluents, et débit moyen enregistré dans le fleuve pendant la période correspondante.

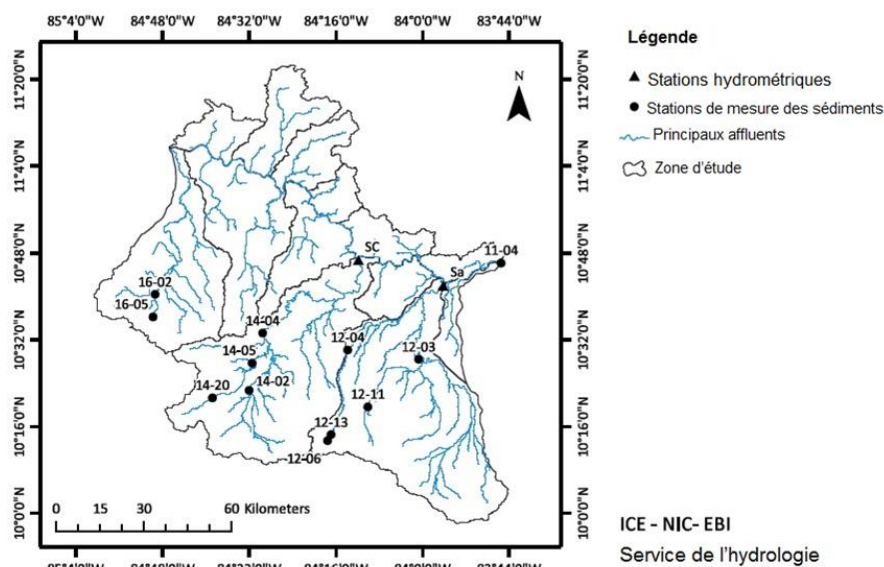


Figure 3.1. Stations de jaugeage hydrologiques situées dans les bassins costa-riens dont les eaux s'écoulent dans le fleuve San Juan

Tableau 3.2. Caractéristiques des stations de jaugeage hydrologiques situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan

COD	Nom de la station	Coordonnées CRTM-05		Période d'enregistrement de l'échantillonnage					
				Échelle quotidienne			Échelle horaire		
		X	Y	DPE	FPE	AR	DPE	FPE	AR
11-04	Delta Colorado	526434	1190821	2010	2014	3,6	2010	2014	3,6
12-03	Puerto Viejo	498692	1158025	1968	1999	30,5	1995	1998	3,0
12-04	Veracruz	474785	1161207	1971	2014	42,1	1995	2014	17,6
12-06	Toro	467991	1130400	1993	2014	20,6	1993	2014	18,7
12-11	San Miguel	481560	1141878	1998	2014	9,7	1998	2014	9,4
12-13	Río Segundo	469116	1132339	1999	2014	15,4	1999	2014	14,6
14-02	Jabillos	441528	1147419	1963	2014	51,2	1994	2014	18,4
14-04	Terron Colorado ^a	446162	1166915	1980	2008	28,7	1995	2008	11,8
14-05	Peñas Blancas ^b	442605	1156821	1968	2014	45,9	1995	2014	18,9
14-20	Pocosol	429133	1145006	1980	2014	34,0	1992	2014	20,8
16-02	Guatuso	409975	1180225	1968	2014	45,9	1995	2014	18,3
16-05	Santa Lucía	409268	1172575	1982	2014	31,8	1994	2014	18,5

Note : COD = code de la station ; X = coordonnée Est ; Y = coordonnée Nord ; DPE = début de la période d'enregistrement ; FPE = fin de la période d'enregistrement ; AR = nombre d'années réelles.

^a Depuis 1980, la station hydrologique Terron Colorado est régulée par la construction du barrage réservoir Arenal.

^b Depuis 2002, la station hydrologique Peñas Blancas est régulée par la centrale hydraulique Peñas Blancas.

Tableau 3.3. Caractéristiques des stations de jaugeage hydrologiques situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan

COD	Nom de la station	Nom du fleuve	Bassin	ZD (km ²)	Qa (m/s)	
					Quotidien	Horaire
11-04	Delta Colorado	Colorado	San Juan	11 479 ^a	1002,7	1002,5
12-03	Puerto Viejo	Sarapiquí	Sarapiquí	841	113,4	114,0
12-04	Veracruz	Toro	Sarapiquí	195	26,2	29,2
12-06	Toro	Toro	Sarapiquí	41	4,3	4,3
12-11	San Miguel	Volcán	Sarapiquí	59	11,1	11,2
12-13	Río Segundo	Segundo	Sarapiquí	17	2,6	2,6
14-02	Jabillos	San Carlos	San Carlos	538	51,1	51,9
14-04	Terrón Colorado	San Carlos	San Carlos	1552	153,4	169,5
14-05	Peñas Blancas	Peñas Blancas	San Carlos	297	35,0	35,5
14-20	Pocosol	Peñas Blancas	San Carlos	124	17,9	17,5
16-02	Guatuso	Frío	Frío	241	28,0	30,2
16-05	Santa Lucía	Venado	Frío	34	3,9	4,1

Note : COD = code de la station ; ZD = zone de drainage ; Qa = débit annuel moyen.

^a La valeur indiquée correspond uniquement à la zone d'étude ; l'impluvium, qui comprend le lac Nicaragua et les bassins dont les eaux sont drainées directement par ce lac, représente approximativement 40 541 km².

Depuis les années 1950, l'ICE effectue des mesures de l'écoulement à des fins hydrauliques. Des dispositifs de mesure classiques — tels que courantomètres mécaniques — ainsi que des appareils plus modernes — courantomètres acoustiques — sont utilisés sur la zone d'étude afin de générer des courbes de tarage de débit et de sédiments en suspension pour chacune des stations de jaugeage hydrologiques présentées dans les tableaux 3.2 et 3.3, et pour l'embouchure des fleuves Sarapiquí et San Carlos.

Le nombre de prélèvements du débit effectués, ainsi que les dispositifs de mesures et la période d'échantillonnage, sont indiqués dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Mesures du débit de l'écoulement dans les stations de jaugeage hydrologiques et sédimentologiques situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan

COD	Nom de la station	Nombre d'échantillons	Dispositif de mesure	PE	
				DPE	FPE
11-04	Delta Colorado	78	Courantomètres acoustiques	2010	2014
12-03	Puerto Viejo	514	Courantomètres mécaniques	1968	1999
12-04	Veracruz	597	Courantomètres mécaniques	1971	2014
12-06	Toro	438	Courantomètres mécaniques	1993	2014
12-11	San Miguel	115	Courantomètres mécaniques	1998	2014
12-13	Río Segundo	206	Courantomètres mécaniques	1999	2014
14-02	Jabillos	789	Courantomètres mécaniques	1958	2014
14-04	Terrón Colorado	396	Courantomètres mécaniques	1968	2014
14-05	Peñas Blancas	771	Courantomètres mécaniques	1968	2014
14-20	Pocosol	693	Courantomètres mécaniques	1978	2014
16-02	Guatuso	1021	Courantomètres mécaniques	1968	2014
16-05	Santa Lucia	459	Courantomètres mécaniques	1976	2014
Bsa	Boca Sarapiquí	27	Courantomètres acoustiques	2011	2014
BSC	Boca San Carlos	27	Courantomètres acoustiques	2011	2014

Note : COD = code de la station ; NSE = nombre de sous-échantillons ; PE = période d'enregistrement ; DPE = début de la période d'enregistrement ; FPE = fin de la période d'enregistrement

3.3. Données sédimentologiques

Tout comme pour les mesures d'écoulement, depuis les années 1960, l'ICE effectue des échantillonnages des sédiments en suspension sur la pente septentrionale costa-ricienne. Des échantillons de sédiments ont été recueillis sur le terrain par l'unité URM, puis traités par l'unité ULQ qui a chiffré la concentration des sédiments en suspension, la granulométrie et les diamètres caractéristiques.

Pour le présent rapport, plus de 2350 échantillons de sédiments en suspension provenant de la base de données sédimentologique de l'ICE ont été analysés dans le but de définir les courbes de tarage des sédiments en suspension pour les quatorze points de fleuve présentés dans le tableau 3.4. Des informations utiles, telles que le nombre d'échantillons individuels prélevés pour chaque point du fleuve et la période d'échantillonnage, sont incluses dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5. Caractéristiques des stations de jaugeage de sédiments en suspension situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan

COD	Nom de la station	NSE	NE	NEDD	PEE	
					DPE	FPE
11-04	Delta Colorado	255	41	40	2010	2014
12-03	Puerto Viejo	792	264	264	1970	1998
12-04	Veracruz	855	285	285	1972	2012
12-06	Toro	369	123	123	1995	2013
12-11	San Miguel	168	56	56	1998	2010
12-13	Río Segundo	78	26	26	1999	2009
14-02	Jabillos	1 029	343	343	1967	2013
14-04	Terrón Colorado	162	54	54	1998	2009
14-05	Peñas Blancas	936	312	312	1970	2011
14-20	Pocosol	834	278	278	1980	2012
16-02	Guatuso	1 113	371	371	1970	2013
16-05	Santa Lucía	465	155	155	1984	2011
BSa	Boca Sarapiquí	92	28	23	2011	2014
BSC	Boca San Carlos	89	27	23	2011	2014

Note : COD = code de la station ; NSE = nombre de sous-échantillons ou d'échantillons individuels ; NE = nombre d'échantillons ; NEDD = nombre d'échantillons avec données de débit ; PEE = période d'enregistrement de l'échantillon ; DPE = début de la période d'enregistrement ; FPE = fin de la période d'enregistrement

Des échantillons de charge de fond ont été prélevés sur une base mensuelle dans le fleuve Colorado (à la station de jaugeage hydrologique de Delta Colorado) et dans l'embouchure des fleuves Sarapiquí et San Carlos à compter de 2010. Le nombre d'échantillons de charge de fond analysés et la période d'échantillonnage correspondante sont reportés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6. Caractéristiques des stations de jaugeage de courbe granulométrique situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan

COD	Nom de la station	NSE	NE	NEDD	PEE	
					DPE	FPE
11-04	Delta Colorado	156	32	28	2010	2014
BSa	Boca Sarapiquí	75	25	21	2011	2014
BSC	Boca San Carlos	72	24	20	2011	2014

Note : COD = code de la station ; NSE = nombre de sous-échantillons ou d'échantillons individuels ; NE = nombre d'échantillons ; NEDD = nombre d'échantillons avec données de débit ; PEE = période d'enregistrement d'échantillon ; DPE = début de la période d'enregistrement ; FPE = fin de la période d'enregistrement

L'estimation du transport sédimentaire au niveau des stations de jaugeage hydrologiques répertoriées dans le tableau 3.5 a été réalisée en tenant compte des concentrations de sédiments en suspension, des granulométries de charge de fond et des enregistrements de séries temporelles de débit. Les taux de transport sédimentaire pour toutes les stations de jaugeage hydrologiques, à l'exception de Boca Sarapiquí et Boca San Carlos, ont été calculés d'après la méthode des sommes de Riemann (appelée ci-après méthode des séries temporelles) ; les taux de transport sédimentaire à Boca Sarapiquí et Boca San Carlos ont été estimés à partir de la modélisation statistique des courbes des débits classés sans dimension (ci-après méthode des courbes des débits classés) d'après Foster (1933).

3.4. Données spatiales

Un modèle numérique d'élévation (MNE) hydrologiquement correct de 30 m a été produit pour la zone d'étude (voir la figure 3.2) au moyen de l'algorithme d'interpolation Topo vers Raster du système d'information géographique SIG d'ArcGIS®. Des courbes de niveau numérisées basées sur la cartographie officielle au 1/50 000 de l'institut géographique national du Costa Rica (IGNCR, 1988) ont été utilisées comme entrées pour la pente septentrionale costa-ricienne, tandis que des données ponctuelles extraites d'ASTER GDEM (METI-NASA, 2014) ont servi d'informations de base pour la pente méridionale nicaraguayenne. Un processus d'application du drainage a été mis en œuvre au moyen de données linéaires de cours d'eau numérisées, à partir de la cartographie au 1/50 000 (1970) du service d'imagerie et de cartographie des Etats-Unis.

La figure 3.3 présente la carte de la couverture du sol de la zone d'étude. Cette carte a été réalisée à partir de l'imagerie satellitaire RapidEye pour la période 2009-2010, et des procédures de classification automatique ont été utilisées pour la pente septentrionale costa-ricienne tandis qu'une vectorisation basée sur l'interprétation visuelle a été appliquée pour la pente méridionale nicaraguayenne.

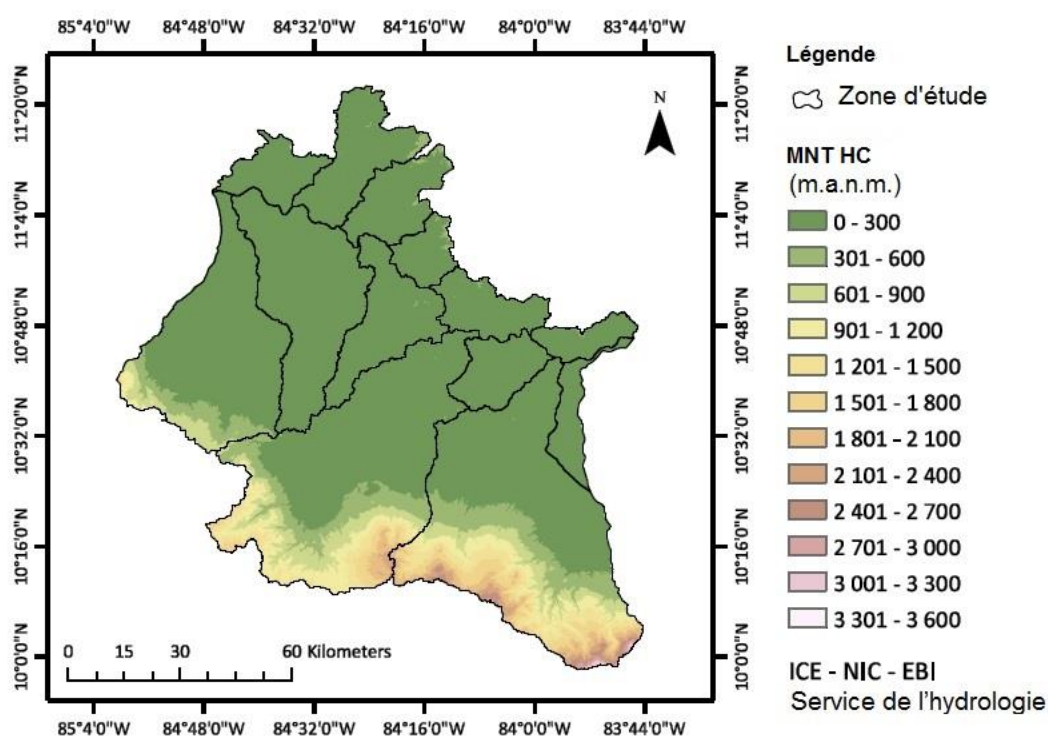


Figure 3.2. Modèle numérique d'élévation hydrologiquement correct de la zone d'étude

Note : basé sur l'IGNCR (1988), le METI-NASA (2014) et l'U.S. NIMA (1970)

La figure 3.4 présente la carte des types de sol de la zone d'étude, selon la classification taxonomique des sols de l'USDA en catégories et sous-catégories. Les informations concernant les sols se fondent sur la carte des ordres et sous-ordres des sols au 1/200 000 du Costa Rica publiée par l'ACCS (2013) et sur les informations numérisées de l'INETER (2008, p. 58).

Enfin, l'institut national de météorologie (ci-après IMN) a fourni un champ continu de précipitations annuelles moyennes (figure 3.5) pour l'ensemble de la zone d'étude. La carte a été réalisée à partir des stations pluviométriques de l'IMN et de la carte officielle des précipitations annuelles moyennes de l'INETER (2004) pour la période 1971-2000.

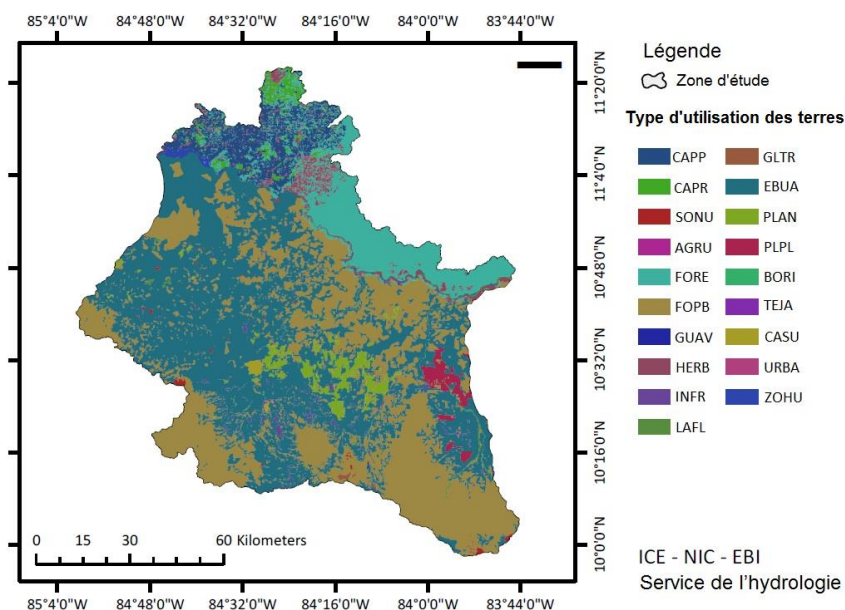


Figure 3.3. Carte de la couverture du sol de la zone d'étude

Note : basée sur l'imagerie satellitaire RapidEye pour la période 2009-2010. CAPP = cultures annuelles et permanentes mêlées à des pâturages ; CAPR = cultures annuelles et permanentes ; SONU = sol nu ; AGRU = plantation d'agrumes ; FORE = forêt ; FOPB = forêt, plantation forestière, buissons ; HERB = herbes ; GUAV = plantation de goyaviers ; INFR = infrastructures ; LAFL = lac, fleuve ; GLTR = glissement de terrain ; EBUA = enclos avec quelques buissons ou arbres ; PLAN = plantation d'ananas ; PLPL = plantation de plantain ; BORI = bord de fleuve ; TEJA = terre en jachère ; CASU = plantation de canne à sucre ; URBA = zone urbaine ; ZOHU = zone humide.

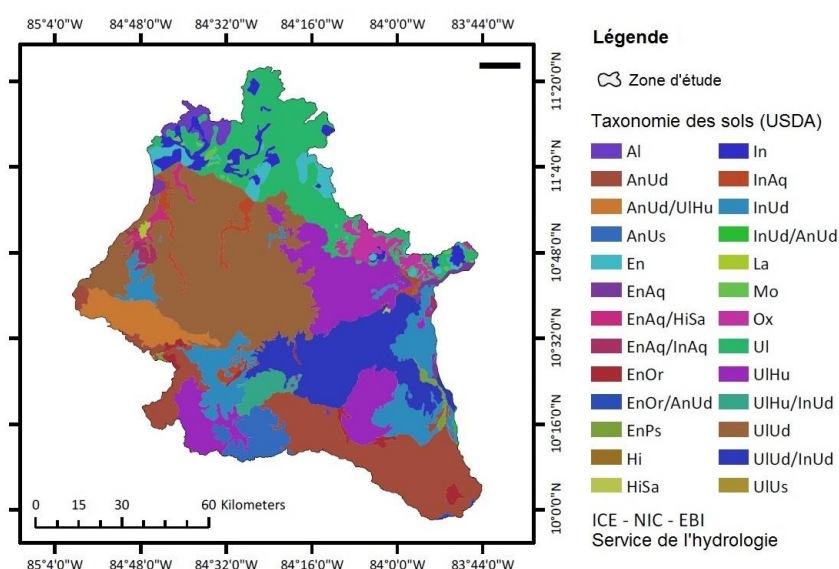


Figure 3.4. Carte taxonomique des sols de la zone d'étude

Note : basée sur «Subórdenes de suelo de Costa Rica [fichier SIG]», de l'Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo [ACCS], 2013, et «Estudio del suelo del departamento de Río San Juan», de l'Institut nicaraguayen d'études territoriales [INETER], 2008. Al = alfisols ; AnUd = andisols udands ; AnUd/UIHu = andisols udands ou ultisols humults ; AnUs = andisols ustands ; En = entisols ; EnAq = entisols aqueuts ; EnAq/HiSa = entisols aqueuts ou histosols saprists ; EnAq/InAq = entisols aqueuts ou iceptisols aqueuts ; EnOr = entisols orthents ; EnOr/AnUd = entisols orthents ou andisols udands ; EnPs = entisols psammments ; Hi = histosols ; HiSa = histosols saprists ; In = inceptisols ; InAq = inceptisols aqueuts ; InUd = inceptisols udepts ; InUd/AnUd = inceptisols udepts ou andisols udands ; Mo = mollisols ; Ox = oxisols ; UI = ultisols ; UIHu = ultisols humults ; UIHu/InUd = ultisols humults ou inceptisols udepts ; UIUd = ultisols udults ; UIUd/InUd = ultisols udults ou inceptisols udepts ; UIUs = ultisols ustults.

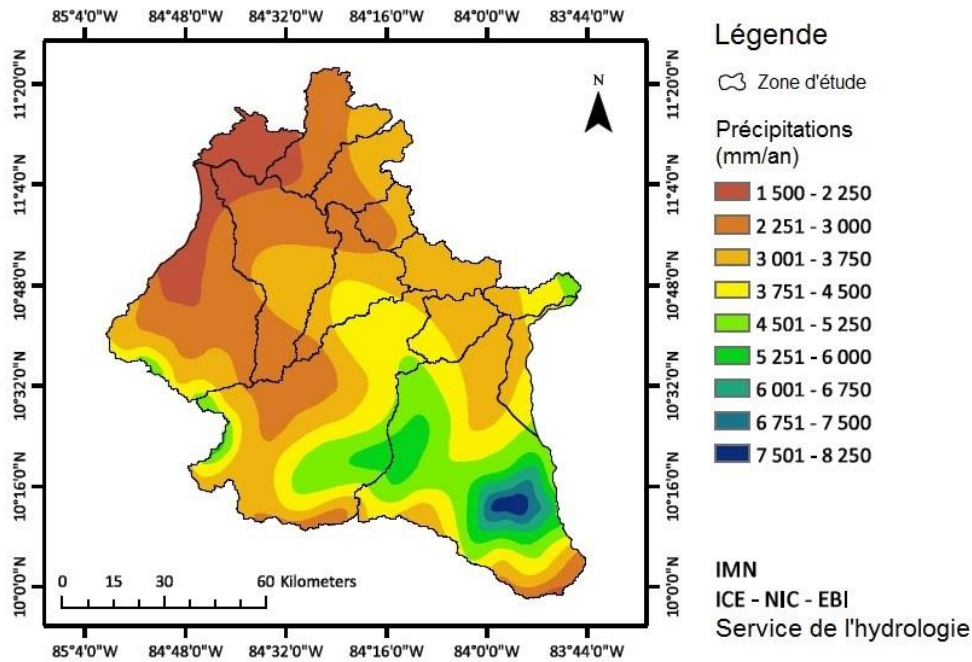


Figure 3.5. Champ de précipitations annuelles moyennes pour l'ensemble de la zone d'étude

Note : sur la base des stations pluviométriques de l'IMN et de «Precipitación media anual en milímetros (mm) Periodo 1971-2000», de l'Institut nicaraguayen d'études territoriales [INETER], 2004.

4. CHARGE EN SUSPENSION

Le présent chapitre décrit la méthodologie utilisée pour estimer la charge des sédiments en suspension des douze stations de jaugeage hydrologiques répertoriées dans le tableau 3.2. Les courbes de tarage de la charge des sédiments en suspension ont été estimées à partir d'échantillons de concentration de sédiments en suspension, et les valeurs de production annuelle moyenne de sédiments en suspension ont été calculées à partir des sommes de Riemann. Enfin, les intervalles de confiance pour la production annuelle moyenne de sédiments en suspension ont été calculés en fonction du temps et de la variabilité des échantillons.

Des échantillons du débit (tableau 3.4) et des sédiments en suspension (tableau 3.5) ont été analysés pour générer des courbes de tarage de sédiments en suspension (ci-après CTSS) pour les quatorze points de fleuve mentionnés dans le chapitre précédent. Les concentrations de sédiments en suspension ont été transformées en charge en suspension (CSS) au moyen de la formule ec.1

$$Q_s = \frac{Q}{(10^6 C_s^{-1} - 1)} \quad \text{ec. 1}$$

dans laquelle Q_s représente la charge en suspension en t/s, Q le débit instantané en m^3/s et C_s la concentration de sédiments en suspension en mg/l. Les concentrations ont été estimées en moyennes simples et pondérées du débit, compte tenu des profils de vitesse produits par le courantomètre acoustique. Aucune différence significative n'ayant été relevée entre les deux méthodologies, le critère de choix a reposé sur la taille de l'échantillon, et la valeur moyenne ordinaire a été sélectionnée comme procédé de détermination de la moyenne pour des échantillons de la concentration. La figure 4.1 présente une comparaison entre les deux méthodologies.

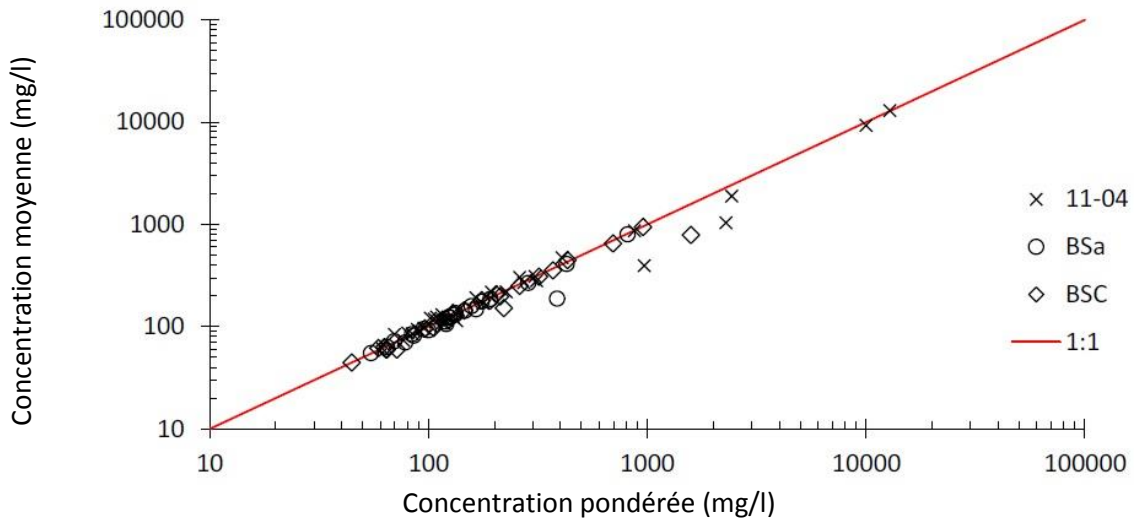


Figure 4.1. Comparaison des concentrations moyennes simples et des concentrations moyennes pondérées du débit pour les fleuves Colorado (11-04), Sarapiquí (BSa) et San Carlos (BSC)

Il importe de prendre en compte le fait que, bien que la CTSS représente une relation entre le débit et la charge solide, cette corrélation n'implique pas forcément une causalité. Il s'agit de deux phénomènes distincts qui, dans certains cas, sont déclenchés par la même variable (épisodes de précipitations) et, dans d'autres, ne présentent aucune corrélation (par exemple, enregistrement de concentrations élevées en raison de processus d'érosion massive, tels que ravinement et glissements de terrain).

Compte tenu de ces éléments, il a été décidé d'utiliser tous les points des ensembles de données débit-concentration pour générer la CTSS correspondant à chaque station hydrologique. Une fonction puissance a été sélectionnée, car ce type de relation entre ces deux variables spécifiques est largement accepté à des fins hydrologiques. En outre, une fonction puissance de la forme $y = ax^b$ passe par l'origine pour toutes les valeurs a et b — une condition essentielle à la modélisation du processus physique.

Ainsi, une fonction puissance a été adaptée pour chaque station hydrologique au moyen de la méthode des moindres carrés. Des intervalles de confiance et de prévision de 95 % ont été estimés dans chaque cas afin de quantifier l'incertitude. A titre d'exemple, la figure 4.2 présente la CTSS pour la station de jaugeage Delta Colorado. La CTSS correspondant aux treize autres points de fleuve indiqués dans le tableau 3.5 figure dans l'appendice à ce rapport.

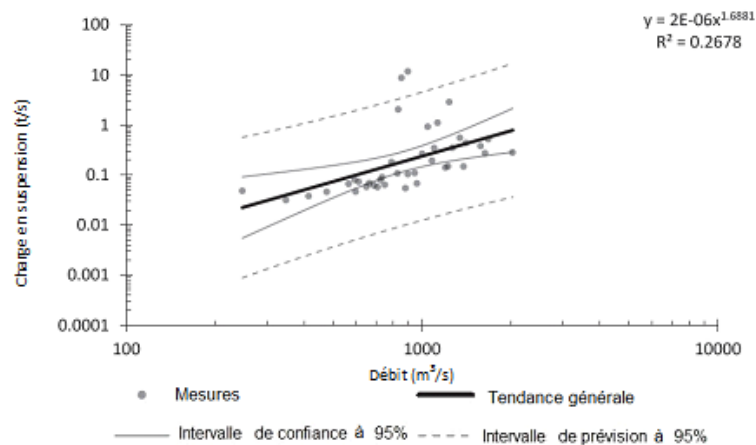


Figure 4.2. Courbe de tarage de la charge des sédiments en suspension à la station de jaugeage Delta Colorado (11-04)

La CTSS a été utilisée, avec les enregistrements de débit, pour produire des séries temporelles de CSS quotidienne et horaire pour chaque point de fleuve. La production sédimentaire annuelle moyenne a ensuite été estimée en tant qu'intégrale des séries temporelles de CSS divisée par la longueur réelle de chaque période d'enregistrement. Etant donné que les séries temporelles quotidienne et horaire sont des variables discrètes, et non continues, la méthode des sommes de Riemann a été mise en œuvre pour évaluer approximativement l'intégrale des séries temporelles de CSS en tant que somme de rectangles de largeur constante et de hauteur variable.

En outre, conformément à Jansson (1992), des facteurs de correction entre les estimations quotidienne et horaire ont été calculés pour chaque point de fleuve. Selon Jansson, des estimations basées sur des données horaires donnent des valeurs de production sédimentaire supérieures à celles basées sur des enregistrements quotidiens. Ces différences résultent de l'augmentation du coefficient de variation (CV) des séries temporelles et de la nature puissance de la fonction CTSS.

Les valeurs de production de sédiments ont été estimées selon des échelles chronologiques horaire et quotidienne durant la même période pour toutes les stations hydrologiques reportées dans le tableau 4.1. Des facteurs de correction ont été calculés en tant que rapport entre les valeurs de production horaire et quotidienne, respectivement. Enfin, les valeurs de production basées sur des enregistrements quotidiens pour toute la période d'enregistrement ont été multipliées par le facteur de correction susmentionné.

Tableau 4.1. Production de sédiments en suspension observée dans les stations de jaugeage

COD	Nom de la station	Charge en suspension (t/an)				
		Moyenne	ICIT	ICST	ICI CTSS	ICS CTSS
11-04	Delta Colorado	7 599 000	2 611 000	12 586 000	4 023 000	15 148 000
12-03	Puerto Viejo	161 000	141 000	182 000	140 000	186 000
12-04	Veracruz	86 000	37 000	135 000	62 000	123 000
12-06	Toro	12 000	7000	17 000	8000	18 000
12-11	San Miguel	22 000	12 000	33 000	13 000	40 000
12-13	Río Segundo	2000	1000	3000	1000	6000
14-02	Jabillos	215 000	155 000	274 000	170 000	274 000
14-04	Terrón Colorado	1 175 000	988 000	1 362 000	783 000	1 806 000
14-05	Peñas Blancas	141 000	115 000	167 000	116 000	172 000
14-20	Pocosol	130 000	85 000	175 000	98 000	174 000
16-02	Guatuso	55 000	49 000	61 000	48 000	62 000
16-05	Santa Lucía	3000	3000	4000	3000	4000

Note : COD = code de la station ; ICIT = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICST = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICI CTSS = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments en suspension ; ICS CTSS = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments en suspension.

Les valeurs de production annuelle moyenne de sédiments en suspension estimées au moyen de cette méthodologie sont présentées dans le tableau 4.1, de même que les intervalles de confiance de 95 % dus à la variabilité des séries temporelles et à l'incertitude de la CTSS ; en outre, des intervalles de confiance en tant qu'anomalies normalisées sont inclus dans le tableau 4.2. Enfin, les informations du tableau 4.1 sont intégrées dans le tableau 4.3 et la figure 4.3 en tant qu'apports sédimentaires spécifiques (par exemple normalisés par la zone de drainage).

Tableau 4.2. Intervalles de confiance en tant qu'anomalies normalisées pour la production de sédiments en suspension observée dans les stations de jaugeage

COD	Nom de la station	IVST (anomalies normalisées)		IVSS (anomalies normalisées)	
		ICI	ICS	ICI	ICS
11-04	Delta Colorado	-66 %	+66 %	-47 %	+99 %
12-03	Puerto Viejo	-13 %	+13 %	-13 %	+15 %
12-04	Veracruz	-58 %	+58 %	-28 %	+43 %
12-06	Toro	-40 %	+40 %	-32 %	+47 %
12-11	San Miguel	-48 %	+48 %	-43 %	+79 %
12-13	Río Segundo	-28 %	+28 %	-61 %	+192 %
14-02	Jabillos	-28 %	+28 %	-21 %	+28 %
14-04	Terrón Colorado	-16 %	+16 %	-33 %	+54 %
14-05	Peñas Blancas	-18 %	+18 %	-18 %	+22 %
14-20	Pocosol	-34 %	+34 %	-25 %	+34 %
16-02	Guatuso	-11 %	+11 %	-12 %	+14 %
16-05	Santa Lucía	-12 %	+12 %	-21 %	+27 %

Note : COD = code de la station ; IVST = incertitude due à la variabilité des séries temporelles ; IVSS = incertitude due à la variabilité des échantillons dans la courbe de tarage des sédiments en suspension ; ICI = intervalle de confiance inférieur à 95 % ; ICS = intervalle de confiance supérieur à 95 %.

Tableau 4.3. Apport sédimentaire spécifique observé dans les stations de jaugeage

COD	Nom de la station	Apport sédimentaire spécifique (t/an/km ²)				
		Moyenne	ICIT	ICST	ICI CTSS	ICS CTSS
11-04	Delta Colorado	662	227	1096	350	1319
12-03	Puerto Viejo	191	167	215	166	220
12-04	Veracruz	450	191	709	324	643
12-06	Toro	291	174	408	199	429
12-11	San Miguel	380	197	562	218	679
12-13	Río Segundo	116	84	148	45	338
14-02	Jabillos	389	281	496	307	497
14-04	Terrón Colorado	755	635	875	503	1160
14-05	Peñas Blancas	481	393	569	396	588
14-20	Pocosol	1051	689	1413	793	1405
16-02	Guatuso	216	192	239	189	247
16-05	Santa Lucía	96	84	107	75	122

Note : COD = code de la station ; ICIT = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICST = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICI CTSS = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments en suspension ; ICS CTSS = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments en suspension.

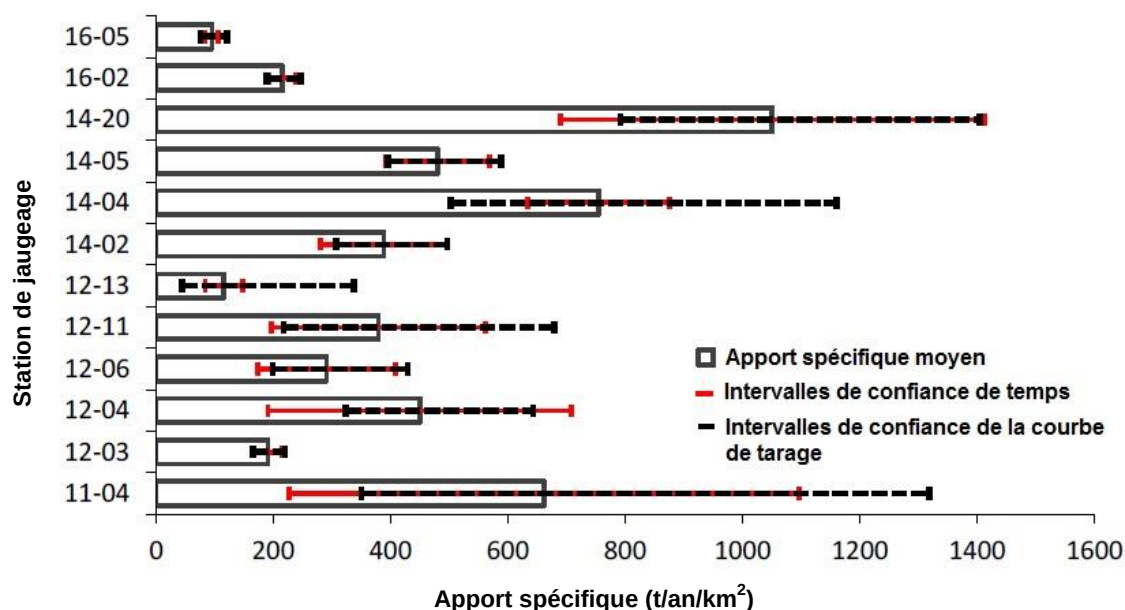


Figure 4.3. Apport sédimentaire spécifique observé dans les stations de jaugeage

5. TRANSPORT DE LA CHARGE DE FOND DANS LE FLEUVE COLORADO

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour estimer la charge de sédiments de fond de la station de jaugeage Delta Colorado. La méthode utilisée pour générer une courbe de tarage de charge de sédiments de fond d'après la formule d'Engelund-Hansen est décrite, et les intervalles de confiance pour la production annuelle moyenne de sédiments du fond sont calculés en fonction de la variabilité temporelle et de la variabilité des échantillons.

Les granulométries des matériaux de la charge de fond ont été analysées pour estimer les diamètres de particules caractéristiques D_{50} et D_{84} , et des paramètres hydrauliques de coupe transversale ont été dérivés des mesures d'écoulements des courantomètres acoustiques. Les données hydrologiques et sédimentologiques provenant de la station de jaugeage Delta Colorado, ainsi que de l'embouchure des fleuves Sarapiquí et San Carlos, ont été utilisées comme entrées dans la formule sur le transport d'Engelund-Hansen selon la procédure décrite dans Garcia (2007).

La pente du fond a été estimée à partir de la relation de résistance hydraulique d'Engelund-Hansen (García, 2007, p. 125) pour les fleuves Colorado, Sarapiquí et San Carlos aux points de contrôle définis par les stations de jaugeage Delta Colorado, Boca Sarapiquí et Boca San Carlos. Il a été noté que la pente était implicitement définie dans la formule indiquée ci-dessus, de sorte que cela a pu être résolu comme un problème d'itération de point fixe. La méthode de Steffensen pour la convergence accélérée a été utilisée, et une solution a été trouvée dans 58 cas sur 69. Étant donné que la formule de résistance hydraulique d'Engelund-Hansen ne remplit pas les conditions fixées par le théorème (la première dérivée doit exister et être limitée pour tous les nombres dans l'intervalle défini), des convergences ne peuvent pas être garanties pour tous les cas, et des divergences sont attendues pour certains échantillons.

Dans le cas particulier du fleuve Colorado, la valeur médiane de la pente à la station de jaugeage de Delta Colorado, sur la base de 26 échantillons de charge de fond sur 28 (deux des échantillons n'ont pas donné de solution pour les raisons mentionnées ci-dessus), a été estimée à $1,79 \times 10^{-4}$ m/m. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle des pentes indiquées par Andrews (2014) et reportées dans le tableau 5.1 pour les portions Boca Sarapiquí — Delta et Delta — Mer des Caraïbes. Cette correspondance entre les mesures de pentes théoriques (dérivées de la relation de résistance hydraulique d'Engelund-Hansen) et sur le terrain — même si elles

concernent des portions de fleuve différentes — semble indiquer que la formule d’Engelund-Hansen est une bonne référence pour la modélisation du transport de la charge de fond dans la partie inférieure du bassin du fleuve San Juan.

Tableau 5.1. Pente décrite dans Andrews (2014) et pente calculée selon la méthode d’Engelund-Hansen présentée dans García (2007)

Portion du fleuve	Valeur de la pente (m/m)
Boca Sarapiquí – Delta	1,70E-04 ^a
Delta – Mer des Caraïbes	1,50E-04 ^a
Section de jaugeage du fleuve Colorado	1,79E-04 ^b

^a Basé sur «An evaluation of the methods, calculations and conclusions provided by Costa Rica regarding the yield and transport of sediment in the Río San Juan Basin», par E. D. Andrews, 2014.

^b Estimation selon la formule d’Engelund-Hansen présentée dans «Sediment transport and morphodynamics», de M.H. García, 2007.

La formule du transport d’Engelund-Hansen a été utilisée pour générer une courbe de tarage de charge de fond (CTCF) pour la station de jaugeage Delta Colorado (voir la figure 5.1). Des intervalles de confiance et de prévision ont été estimés pour quantifier l’incertitude due à la dispersion dans les données échantillonnées. La fonction a été dérivée au moyen de la méthode de calcul pour l’écoulement normal présentée dans Garcia (2007, p. 125) et des mesures hydrologiques et sédimentologiques mentionnées dans le chapitre 3.

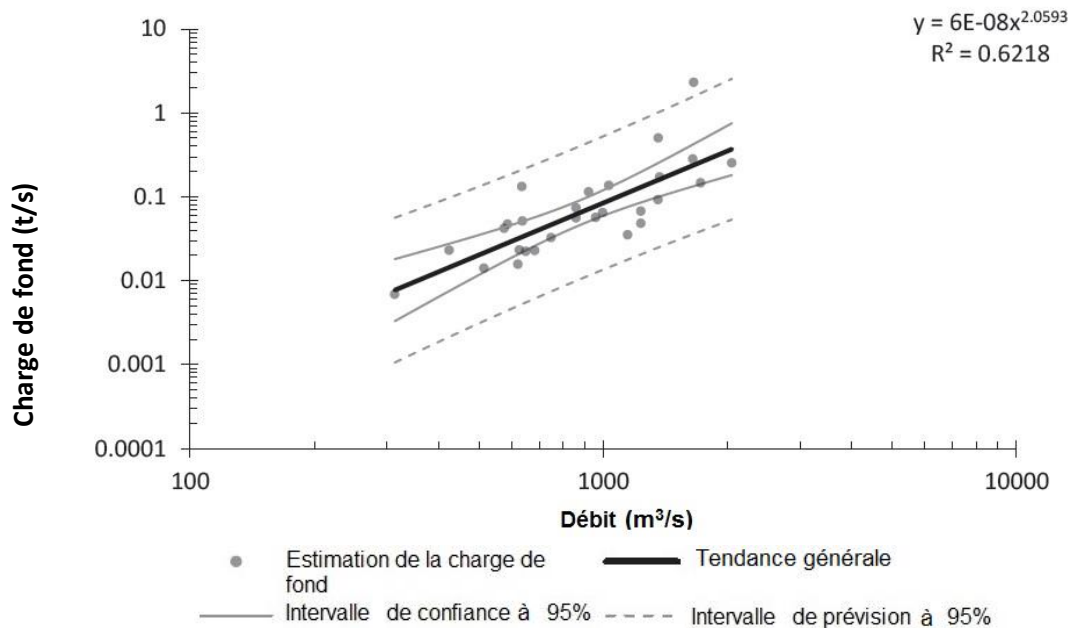


Figure 5.1. Courbe de tarage de la charge de fond à la station de jaugeage Delta Colorado (11-04)

Des valeurs de production de charge de fond ont été estimées directement à partir de séries temporelles d’écoulement horaire, car les périodes d’enregistrement horaire et quotidien étaient égales pour cette station de jaugeage spécifique. Le tableau 5.2 présente les valeurs de production annuelle moyenne de sédiments de fond pour le fleuve Colorado à la station de jaugeage Delta Colorado, ainsi que les intervalles de confiance de 95 % dus à la variabilité des séries temporelles et à l’incertitude de la CTCF.

Tableau 5.2. Production de sédiments de fond à la station de Delta Colorado (11-04)

COD	Nom de la station	Charge sédimentaire de fond (t/an)				
		Moyenne	ICIT	ICST	ICI CTSS	ICS CTSS
11-04	Delta Colorado	2 898 000	719 000	5 077 000	1 798 000	4 809 000

Note : COD = code de la station ; ICIT = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICST = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICI CTSS = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments de fond ; ICS CTSS = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments du lit.

6. ESTIMATION DE LA CHARGE SOLIDE À L'EMBOUCHURE DU SARAPIQUÍ ET DU FLEUVE SAN CARLOS, ET DANS LE FLEUVE SAN JUAN

Ce chapitre expose la méthodologie utilisée pour estimer à la fois la charge de sédiments en suspension et la charge de sédiments de fond aux embouchures des fleuves Sarapiquí et San Carlos et dans le fleuve San Juan en amont du delta. Il présente une description des méthodes utilisées pour générer des courbes de débits classés sans dimension, et une évaluation des différents scénarios de séparation d'écoulement au niveau du delta.

Etant donné qu'aucune station de jaugeage hydrologique n'a été installée aux embouchures des fleuves Sarapiquí et San Carlos, ni dans le fleuve San Juan en amont du delta, il n'existe aucun enregistrement hydrologique pour ces points. En raison de l'absence de séries temporelles de débit, la méthode des sommes de Riemann n'a pas pu être utilisée, et la charge solide pour ces points a été estimée sur la base de méthodes probabilistes.

Une courbe des débits classés (CDC) représente la relation entre la grandeur et la fréquence d'un écoulement quotidien, hebdomadaire ou mensuel (ou un autre intervalle temporel) pour un bassin fluvial spécifique, à condition qu'une estimation de la durée (pourcentage de temps) [d']un écoulement donné soit égale ou dépassée pour la période historique (Vogel et Fennessey, 1994 ; dans Krasovskaia & Gottschalk, 2014, p. 48).

Selon Krasovskaia & Gottschalk (p. 49), «une courbe des débits classés est un tracé de la fonction quantile empirique d'un échantillon, c'est-à-dire le per quantile ou percentile de l'écoulement d'une certaine durée versus une probabilité de dépassement p », p étant

$$p = 1 - P(Q \leq q) = 1 - F_Q(q). \quad \text{ec. 2}$$

Les courbes de débits classés ayant été considérées comme des distributions de probabilités empiriques, il est naturel d'estimer qu'elles peuvent être modélisées selon une distribution de probabilités théoriques — telle que la distribution log-normale à deux paramètres — avec, pour ainsi dire, aucune perte d'informations. En outre, pour des données normalisées, l'on sait que cette distribution peut être exprimée en fonction du coefficient de variation uniquement, et qu'elle pourrait produire l'équivalent d'une courbe de débits classés sans dimension.

Pour la distribution log-normale avec $m_Q \text{ moyenne} = 1$, la fonction de distribution cumulative de l'écoulement Q avec le coefficient de variation V_Q s'écrit :

$$F_Q(q; V_Q) = \int_0^q \frac{1}{q \sqrt{2\pi \ln(1 + V_Q^2)}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(\ln q + \frac{1}{2} \ln(1 + V_Q^2))^2}{\ln(1 + V_Q^2)}} dq \quad \text{ec. 3}$$

tandis que sa fonction quantile peut être exprimée

$$q_p = e^{z_p \sqrt{\ln(1+V_Q^2)} - 0.5 \ln(1+V_Q^2)} \quad \text{ec. 4}$$

z_p étant la variable gaussienne de la probabilité p .

Enfin, la valeur de la courbe des débits classés pour la durée p (Q_p) est un tracé de cette fonction quantile d'échantillon sans dimension de l'écoulement multiplié par la valeur moyenne à long terme versus la probabilité de dépassement p , et peut être calculée comme suit :

$$Q_p = m_Q F_Q^{-1}(1 - p; V_Q) \quad \text{ec. 6}$$

Les courbes des débits classés quotidiennement et horaires ont été modélisées selon cette méthodologie pour les douze stations de jaugeage hydrologique susmentionnées dans le tableau 3.2. La courbe des débits classés horaires empirique (basée sur les séries temporelles) et théoriques (basée sur la distribution des probabilités) pour la station de jaugeage Delta Colorado est représentée sur la figure 6.1.

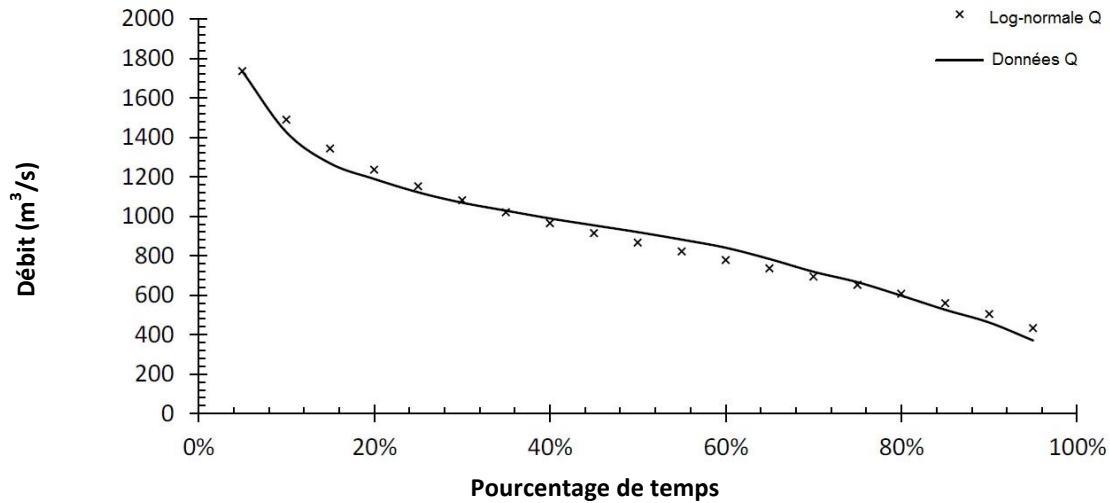


Figure 6.1. Courbe des débits classés horaires empirique (basée sur les séries temporelles) et théorique (basée sur la distribution des probabilités) pour la station de Delta Colorado (11-04)

L'ajustement entre les courbes théoriques et les données empiriques a été évalué par le coefficient d'efficacité de Nash Sutcliffe

$$E = 1 - \frac{E[(M - O)^2]}{s_o^2} = 2r_{OM} \frac{s_M}{s_o} - \left(\frac{s_M}{s_o}\right)^2 - \frac{(m_M - m_o)^2}{s_o^2} \quad \text{ec. 7}$$

M étant le modèle et O les observations, r le coefficient de corrélation, et m et s l'écart moyen et l'écart-type. Le coefficient d'efficacité de Nash Sutcliffe est un critère de performance très complexe, car non seulement il inclut une mesure du meilleur ajustement linéaire, mais il prend également en compte le biais dans la moyenne et les variances.

Des tracés QQ pour les quantiles empiriques et théoriques ont été élaborés pour chaque station de jaugeage à l'échelle quotidienne et à l'échelle horaire, et le coefficient d'efficacité de Nash Sutcliffe a été estimé pour chacune d'elles. Ces valeurs, de même que la zone de drainage de chaque station de jaugeage, sont reportées sur la figure 6.2. L'on note que la correspondance entre les quantiles observés et modélisés est élevée, avec des valeurs d'efficacité supérieures à 0,92 (0,94) à l'échelle horaire (quotidienne) dans 13 cas sur 14, et supérieures à 0,70 (0,80) dans tous les cas.

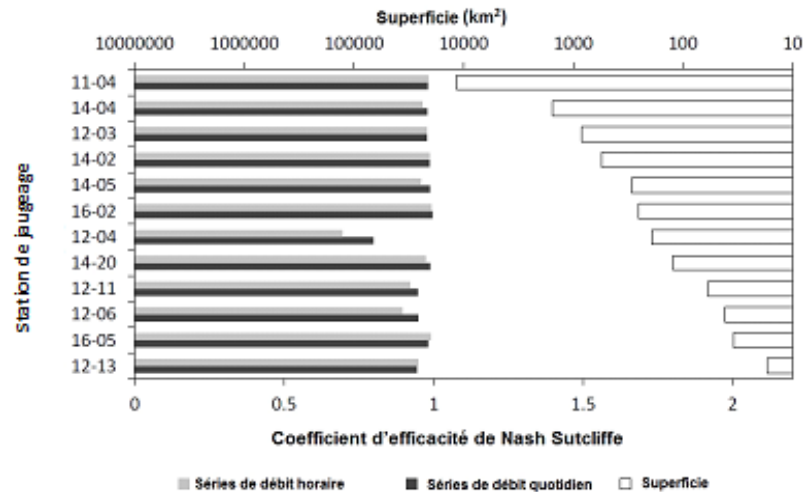


Figure 6.2. Coefficient d'efficacité de Nash Sutcliffe entre la courbe des valeurs classées modélisée et la courbe des valeurs classées obtenue sur la base des séries temporelles de débit

En outre, selon García & Fernández (2014, p. 25), il est possible d'estimer la charge annuelle moyenne des sédiments en suspension pour une station de jaugeage spécifique en appliquant sa CTSS à sa courbe des débits classés correspondante. Cette procédure donne une courbe des débits classés de la charge des sédiments en suspension qui peut être numériquement intégrée pour estimer la charge annuelle moyenne des sédiments en suspension.

Des courbes des débits classés modélisées (basées sur la distribution des probabilités) et de tarage de la charge en suspension (voir annexe) ont été utilisées en entrée, et la charge annuelle moyenne des sédiments en suspension a été estimée pour les stations de jaugeage dans la zone d'étude au moyen de la méthodologie décrite précédemment. La figure 6.3 présente une comparaison entre cette méthode des courbes modélisées des valeurs classées de sédiments et la méthode des séries temporelles expliquée dans le chapitre 4 (croix noires). Des coefficients de détermination R^2 et d'efficacité de Nash Sutcliffe de 0,9996 et 0,9864, respectivement, ont été rapportés. Comme le montre la figure 6.3, la concordance entre les deux méthodologies est remarquablement bonne. Cette comparaison a également été faite pour des estimations de la charge de fond (cercle) à la station de jaugeage Delta Colorado, et le résultat était comparable aux autres (voir le cercle sur la figure 6.3).

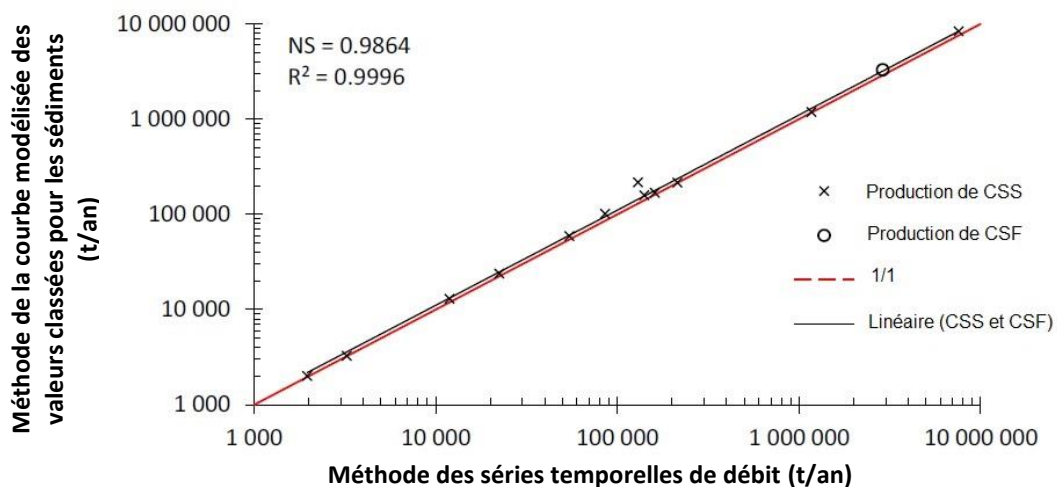


Figure 6.3. Charge en suspension et charge de fond, sur la base des courbes de valeurs classées modélisées et de la méthode des séries temporelles de débit

Jusqu'à présent, il a été montré que les estimations annuelles moyennes de la charge en suspension et de la charge de fond pouvaient être calculées avec une grande précision à partir des courbes de débits classés (observées ou modélisées) et de leurs courbes de tarage des sédiments respectives. Cela signifie que des estimations sédimentaires ont pu être réalisées pour des valeurs moyennes de débit fournies pour des points de fleuve non jaugés, l'écart-type (ou le coefficient de variation) de données quotidiennes ou horaires, et une courbe de tarage des sédiments.

Dans le cas spécifique de l'embouchure des fleuves Sarapiquí et San Carlos, des courbes de tarage de la charge en suspension et des sédiments de fond étaient disponibles, de sorte que seules les valeurs moyennes à long terme du débit et l'écart-type (ou coefficient de variation) des données horaires et quotidiennes ont dû faire l'objet d'une estimation pour permettre le calcul des charges solides annuelles moyennes. Des valeurs de débit moyen à long terme ont été estimées d'après la méthodologie précipitations-zone à partir d'informations (zone de drainage et débit moyen) provenant des stations de jaugeage Terrón Colorado (14-04), Puerto Viejo (12-03) et Veracruz (12-04) et des précipitations spatiales moyennes extraites du champ de précipitations représenté sur la figure 3.5.

Par ailleurs, le coefficient de variation a été estimé compte tenu du fait que ce rapport spécifique des moments, dans le même bassin versant, tend à diminuer à mesure que la zone de drainage augmente. Ce comportement est, fort probablement, dû à l'amortissement des processus météorologiques et hydrologiques, et au fait que tous les affluents s'écoulant dans le fleuve principal représentent la somme de deux variables aléatoires corrélées, de sorte que le signal en résultant aura tendance à se rapprocher de la normale à mesure que le processus se poursuit.

Les coefficients de variation horaires et quotidiens de six stations de jaugeage hydrologiques situées sur la pente septentrionale du Costa Rica sont représentés sur la figure 6.4 en fonction de leur zone de drainage. Comme énoncé plus haut, une réduction du coefficient de variation a pu être relevée pour les deux échelles temporelles à mesure que la zone de drainage augmente. Deux fonctions Puissance ont été ajustées aux données, avec des valeurs R^2 respectivement égales à 0,94 et 0,99 pour des données horaires et quotidiennes. Ces fonctions ont été utilisées pour estimer, sur la base des zones de bassin, le coefficient de variation à l'embouchure des fleuves Sarapiquí et San Carlos pour les deux échelles de temps.

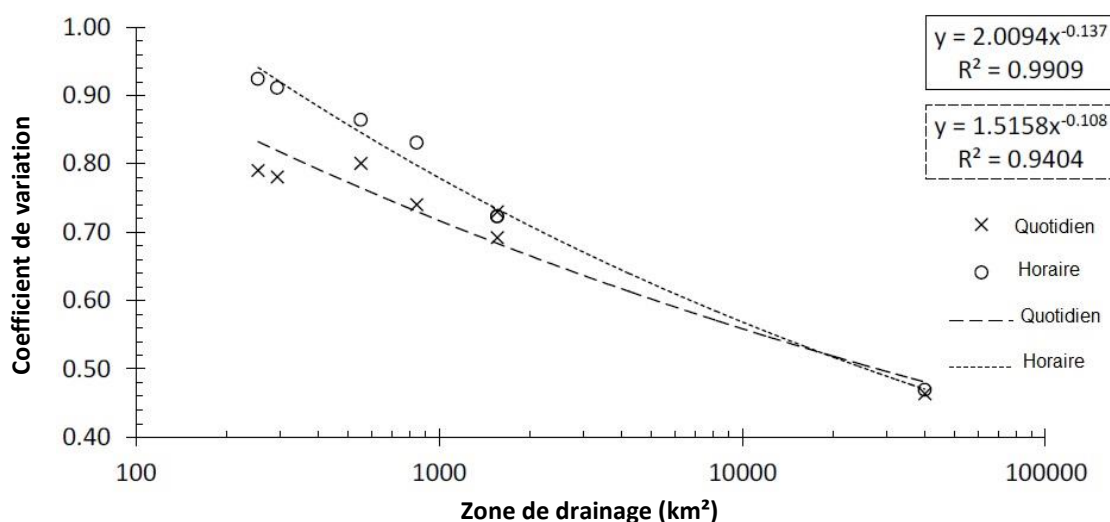


Figure 6.4. Coefficient de variation horaire et quotidien, en fonction de la zone de drainage du bassin, sur la base de six stations de jaugeage situées dans les bassins des affluents du fleuve San Juan (pente costa-ricienne)

La charge solide annuelle a été estimée pour les fleuves Sarapiquí et San Carlos selon la méthodologie décrite ci-dessus. Le tableau 6.1 en présente les résultats, avec leur zone de drainage, leur débit moyen, et leurs coefficients de variation horaires et quotidiens respectifs.

Tableau 6.1. Zone de drainage, valeur moyenne du débit, coefficients de variation horaire et quotidien, et charge solide annuelle moyenne pour les fleuves Sarapiquí et San Carlos

COD	Station	ZD (km ²)	Qa ^a (m ³ /s)	CVQ ^b	CVH ^b	ASS ^c (t/an)
BSa	Boca Sarapiquí	2 643	377	0,647	0,683	2 342 000
BSC	Boca San Carlos	2 771	266	0,644	0,678	2 927 000

Note : COD = code de la station ; ZD = zone de drainage ; Qa = débit annuel moyen ; CVQ = coefficient de variation quotidien ; CVH = coefficient de variation horaire ; ASS = apport de sédiments en suspension.

^a Basé sur la méthodologie précipitations/zone. ^b Basé sur les fonctions coefficient de variation/zone. ^c Basé sur des courbes de valeurs classées de sédiments modélisées.

En raison du manque d'informations publiées sur le transport des sédiments dans le fleuve San Juan en amont du delta, les hypothèses posées pour l'estimation des charges solides annuelles moyennes à ce point spécifique reposaient sur des valeurs élevées. Sur la base de Gómez-Delgado, Leitón-Montero et Aguilar-Cabrera (2013, p. 14), le débit annuel moyen à la station de jaugeage Delta Colorado a été estimé égal à environ 90 % du débit annuel moyen du fleuve San Juan en amont du delta, et les courbes de tarage des sédiments en suspension et des sédiments de fond au niveau de la station de jaugeage Delta Colorado ont été considérées comme de bonnes approximations des courbes de tarage des sédiments du fleuve San Juan au niveau de ce point. En outre, pour évaluer la vraisemblance des calculs du transport de sédiments par rapport à cette hypothèse, et prendre en compte le fait que la séparation du débit varie tout au long de l'année, les taux de transport sédimentaire ont été estimés en posant l'hypothèse de ratios de débits annuels moyens entre le fleuve Colorado et le fleuve San Juan de 85 % et 95 %.

Cette dernière hypothèse ne satisfait pas à la loi de la conservation de la masse, car la linéarité est perdue en raison de la composante puissance des courbes de tarage des sédiments. En d'autres termes, si nous partons du principe que le débit dans le fleuve Colorado (Q_C) est une fraction donnée, disons α , du débit dans le fleuve San Juan (Q_{SJ}) et, ainsi, que le débit dans le cours inférieur du fleuve San Juan (Q_{ISJ}) est égal à $[(1-\alpha)/\alpha] Q_{SJ}$, les charges solides annuelles moyennes estimées avec ces débits ne s'additionneront pas, c'est-à-dire que les estimations du transport des sédiments dans le fleuve San Juan seront supérieures à celles agrégées du fleuve Colorado et du cours inférieur du fleuve San Juan.

Bien que cette condition semble artificielle, un résultat similaire aurait été obtenu même avec des enregistrements de débits et des mesures sédimentaires aux trois points, en raison de la variabilité naturelle des variables hydrologiques. Dans ce dernier cas, la principale différence est que l'incertitude pourrait être quantifiée et qu'un espace de solutions possibles — c'est-à-dire des triplets de charges solides annuelles moyennes au niveau de chaque site — pourrait être trouvé compte tenu d'un certain niveau de confiance.

Ceci étant dit, il importe de reconnaître que, si la procédure présentée ci-dessus n'est pas parfaite, elle est la plus exacte au vu des données disponibles. En outre, étant donné que le fleuve San Juan et le fleuve Colorado sont plus proches l'un de l'autre sur le plan hydraulique que le cours inférieur du fleuve San Juan, il a été décidé d'estimer les charges solides annuelles du San Juan à partir des séries temporelles de débit à Delta Colorado, et de considérer les charges solides annuelles du fleuve San Juan comme étant égales à la différence entre les deux.

Trois scénarios ont été évalués, pour lesquels le débit du fleuve San Juan a été modélisé en tant que débit à la station de jaugeage Delta Colorado multiplié par un facteur de $(100/PSRJ)$, PSRJ correspondant à 85, 90 et 95 % et représentant le rapport de débit annuel moyen hypothétique entre

Delta Colorado et le fleuve San Juan. Des séries temporelles de débits modifiés ont été transformées en séries temporelles de sédiments en suspension et de charge de fond, et les statistiques afférentes ont été calculées. Les résultats pour le fleuve San Juan sont présentés dans le tableau 6.2, pour les charges des sédiments en suspension et des sédiments de fond, et pour les trois scénarios de débit. Il apparaît que lorsque PSSJ = 90, les charges annuelles moyennes de sédiments en suspension et de sédiments de fond dans le fleuve San Juan sont approximativement égales, respectivement, à 9,1 et 3,6 millions de tonnes par an.

La figure 6.5 présente une comparaison graphique entre le ratio des sédiments en suspension et de la charge de fond d'une part, et la charge solide totale du fleuve San Juan d'autre part, pour les valeurs moyennes indiquées dans le tableau 6.2. On constate que ce ratio reste pour ainsi dire inchangé pour l'intervalle de pourcentage de débit supposé et les méthodologies utilisées dans le calcul des charges de sédiments en suspension et de fond.

Tableau 6.2. Charges solides dans le fleuve San Juan en fonction de différents pourcentages de débit s'écoulant dans le fleuve Colorado

PSSJ	Qa (m³/s)	Apport sédimentaire (t/an/km²)				
		Moyenne	ICIT	ICST	ICI CTSS	ICS CTSS
Sédiments en suspension						
95	1 055	8 286 000	2 847 000	13 725 000	4 300 000	16 951 000
90	1 114	9 078 000	3 119 000	15 036 000	4 598 000	19 153 000
85	1 180	9 997 000	3 435 000	16 559 000	4 919 000	21 873 000
Sédiments de fond						
95	1 055	3 221 000	799 000	5 643 000	1 967 000	5 447 000
90	1 114	3 600 000	893 000	6 307 000	2 157 000	6 227 000
85	1 180	4 050 000	1 005 000	7 095 000	2 373 000	7 191 000

Note : PSSJ = pourcentage supposé de débit du fleuve San Juan s'écoulant dans le fleuve Colorado ; Qa = débit annuel moyen ; ICIT = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICST = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICI CTSS = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments en suspension ; ICS CTSS = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments en suspension.

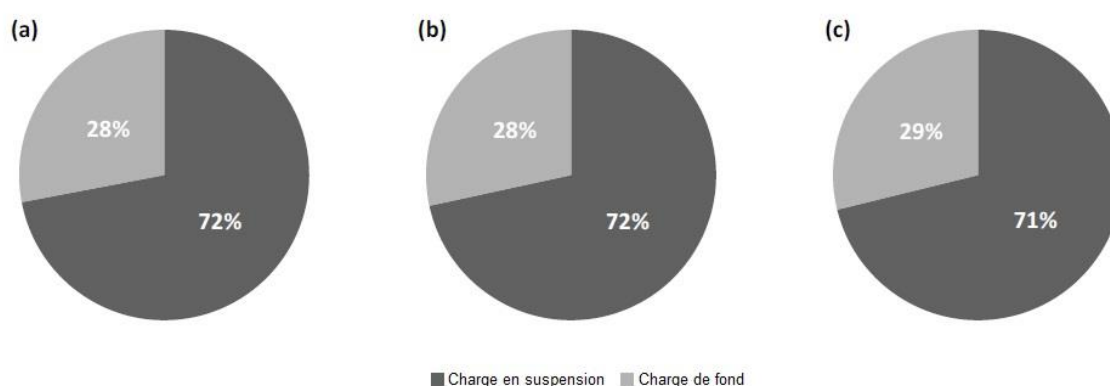


Figure 6.5. Répartition des charges moyennes annuelles de sédiments en suspension et de fond dans le fleuve San Juan dans l'hypothèse où le pourcentage de débit s'écoulant dans le fleuve Colorado est égal à a) 95, b) 90 et c) 85 %

Sur la base des informations présentées dans le tableau 6.2 et des charges annuelles moyennes de sédiments en suspension (tableau 4.1) et de fond (tableau 5.2) estimées pour le fleuve Colorado à la station de jaugeage Delta Colorado, les charges solides dans le cours inférieur du fleuve San Juan ont pu être évaluées approximativement en tenant compte des limites susmentionnées. Le tableau 6.3 présente les résultats des charges de sédiments en suspension et de fond pour les trois scénarios de débit.

Tableau 6.3. Charges solides dans le cours inférieur du San Juan en fonction de différents pourcentages de débit s'écoulant dans le fleuve Colorado

PSSJ	Qa (m³/s)	Apport sédimentaire (t/an/km²)				
		Moyenne	ICIT	ICST	ICI CTSS	ICS CTSS
		Sédiments en suspension				
95	1 055	687 000	236 000	1 139 000	277 000	1 803 000
90	1 114	1 479 000	508 000	2 450 000	575 000	4 005 000
85	1 180	2 398 000	824 000	3 973 000	896 000	6 725 000
		Sédiments de fond				
95	1 055	323 000	80 000	566 000	169 000	638 000
90	1 114	702 000	174 000	1 230 000	359 000	1 418 000
85	1 180	1 152 000	286 000	2 018 000	575 000	2 382 000

Note : PSSJ = pourcentage supposé de débit du fleuve San Juan s'écoulant dans le fleuve Colorado ; Qa = débit annuel moyen ; ICIT = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICST = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à la variabilité des séries temporelles ; ICI CTSS = intervalle de confiance inférieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments en suspension ; ICS CTSS = intervalle de confiance supérieur à 95 % dû à l'incertitude de la courbe de tarage des sédiments en suspension.

Enfin, les figures 6.6 et 6.7 montrent des représentations graphiques de la division des charges des sédiments en suspension et des sédiments de fond au niveau du delta, sur la base des valeurs moyennes présentées dans le tableau 6.3.

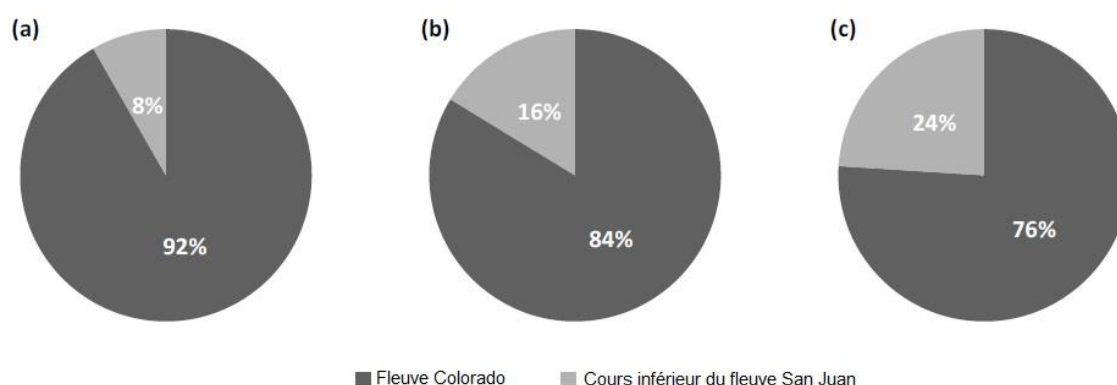


Figure 6.6. Charges moyennes annuelles de sédiments en suspension dans le fleuve Colorado et le cours inférieur du fleuve San Juan, en pourcentage de la charge annuelle moyenne de sédiments en suspension dans le fleuve San Juan, dans l'hypothèse où le pourcentage de débit s'écoulant dans le fleuve Colorado est égal à a) 95, b) 90 et c) 85 %

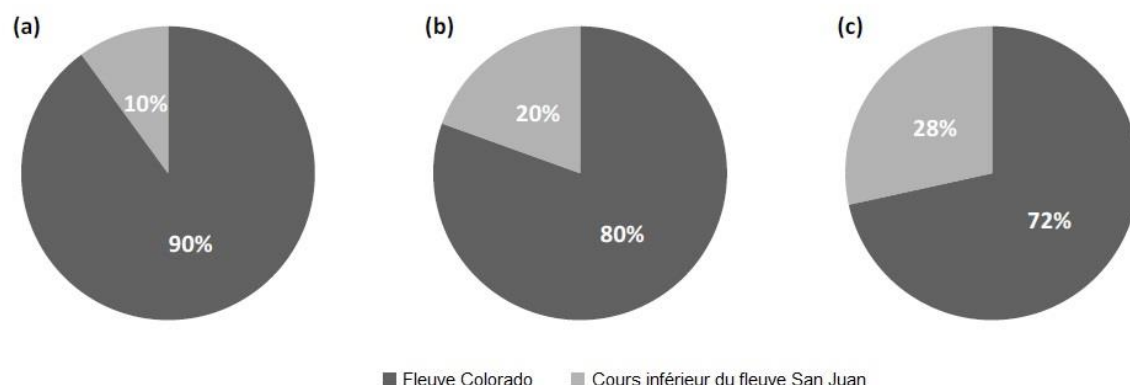


Figure 6.7. Charges annuelles moyennes des sédiments de fond dans le fleuve Colorado et le cours inférieur du fleuve San Juan, en pourcentage de la charge annuelle moyenne de sédiments de fond du fleuve San Juan, dans l'hypothèse où le débit s'écoulant dans le fleuve Colorado est égal à a) 95, b) 90 et c) 85 %

7. MODÈLE D'ÉROSION DU SOL

Ce chapitre décrit les données d'entrée, les méthodes d'étalonnage et la mise en œuvre du modèle d'érosion élaboré pour estimer l'apport sédimentaire dans le bassin du fleuve San Juan. L'équation universelle de la perte de sol (USLE) a servi de base au modèle d'érosion pour permettre d'évaluer approximativement la distribution spatiale de l'érosion dans les bassins dont les eaux sont drainées directement par le fleuve San Juan.

7.1. Données d'entrée

L'USLE est une équation multiplicative dans laquelle l'érosion potentielle du sol (E) est évaluée approximativement par le produit de cinq facteurs différents : le facteur de gestion des cultures et de la couverture végétale (C), le facteur d'érodibilité des sols (K), le facteur (de longueur et d'inclinaison) de pente (LS), le facteur d'érosivité des pluies (R) et le facteur de pratique de conservation (P). Des modèles matriciels pour chacun d'entre eux — à l'exception du facteur P qui, selon une hypothèse prudente, a été considéré comme égal à 1 pour l'ensemble de la zone d'étude — ont été élaborés à partir des informations présentées dans le chapitre 3.

Le codage de la couverture du sol pour le facteur C de l'USLE est indiqué dans le tableau 7.1, de même que la superficie correspondante pour chaque unité géographique.

Tableau 7.1. Types de couverture observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan et superficie correspondante pour chaque unité géographique

Code	Catégorie de couverture de sol	Superficie (km ²)		
		CR	NI	ZE FSJ
AGRU	Plantation d'agrumes	0,4	-----	0,4
SALA	Terre en jachère	0,5	-----	0,5
GUAV	Plantation de goyaviers	0,8	-----	0,8
BORI	Bord de fleuve	4,8	-----	4,8
GLTR	Glissement de terrain	8,5	-----	8,5
SONU	Sol nu	20,7	-----	20,7
ZONA	Zone urbaine	0,2	20,8	21,1
CASU	Plantation de canne à sucre	24,2	-----	24,2
ZOHU	Zone humide	1,9	30,1	32,0
LAFL	Lac, fleuve	59,7	20,4	80,0

Code	Catégorie de couverture de sol	Superficie (km ²)		
		CR	NI	ZE FSJ
INFR	Infrastructure	107,9	-----	107,9
HERB	Herbes	40,3	111,1	151,4
PLPL	Plantation de plantain	123,5	-----	123,5
CAPR	Cultures annuelles et permanentes	-----	193,1	193,1
PLAN	Plantation d'ananas	284,3	-----	284,3
APCP	Cultures annuelles et permanentes mêlées à des pâturages	0,5	520,9	521,4
FORE	Forêt	52,8	1 143,5	1 196,3
FOPB	Forêt, plantation forestière, buissons	3 998,3	1,3	3 999,6
EBUA	Enclos avec quelques buissons ou arbres	4 687,1	21,9	4 709,0

Note : CR = Costa Rica, NI = Nicaragua ; ZE FSJ = zone d'étude du fleuve San Juan.

Les valeurs minimale et maximale de facteur C sur la base de ces catégories, ainsi que la valeur moyenne et le point intermédiaire d'intervalle, sont indiqués dans le tableau 7.2. Des coefficients de variation ont été estimés pour chaque catégorie à partir des distributions de densité de probabilité uniforme, triangulaire symétrique (biaisée), triangulaire asymétrique (non biaisée) et normale. Dans le cas de la distribution normale, il a été supposé que les valeurs minimale et maximale représentaient des intervalles de confiance de 95 % pour la distribution parente correspondante.

Tableau 7.2. Types de couverture observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan et descripteurs de tendance centrale, valeurs limites et coefficient de variation du facteur de couverture C de l'USLE (selon différentes distributions de densité de probabilité)

Code	Valeurs limites		DTC		Coefficient de variation CV			
	Min	Max	Moyenne	PII	DU	DTS	DTA	DN
AGRU	0,0030	0,400	0,1748	0,20150	0,57	0,40	0,40	0,49
SALA	0,3000	0,900	0,6071	0,60000	0,29	0,20	0,20	0,25
GUAV	0,0030	0,400	0,1915	0,20150	0,57	0,40	0,40	0,49
BORI	0,9000	1,000	0,9833	0,95000	0,03	0,02	0,02	0,03
GLTR	0,9000	1,000	0,9833	0,95000	0,03	0,02	0,02	0,03
SONU	0,9000	1,000	0,9833	0,95000	0,03	0,02	0,02	0,03
ZONA	0,0030	0,015	0,0093	0,00900	0,38	0,27	0,27	0,33
CASU	0,0400	0,800	0,2505	0,42000	0,52	0,37	0,38	0,45
INFR	0,0030	0,015	0,0093	0,00900	0,38	0,27	0,27	0,33
HERB	0,0020	0,900	0,0939	0,45100	0,57	0,41	0,45	0,50
PLPL	0,0100	0,600	0,2446	0,30500	0,56	0,39	0,40	0,48
CAPR	0,0100	0,500	0,2475	0,25500	0,55	0,39	0,39	0,48
PLAN	0,1000	0,800	0,4244	0,45000	0,45	0,32	0,32	0,39
APCP	0,0020	0,400	0,0997	0,20100	0,57	0,40	0,42	0,50
FORE	0,0001	0,100	0,0177	0,05005	0,58	0,41	0,43	0,50
FOPB	0,0001	0,300	0,0380	0,15005	0,58	0,41	0,44	0,50
EBUA	0,0020	0,400	0,0997	0,20100	0,57	0,40	0,42	0,50

Note : Min = valeur minimale ; Max = valeur maximale ; DTC = descripteurs de tendance centrale ; PII = point intermédiaire d'intervalle ; DU = distribution uniforme ; DTS = distribution triangulaire symétrique ; DTA = distribution triangulaire asymétrique (valeur moyenne en tant que vertex central) ; DN = distribution normale. D'après «Strategic environmental assessment [volume 5]», de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO], 2001 ; «Capacidad de uso y erosión de los suelos en el Valle central del río Guadalquivir», de Junta de Andalucía, n.d. ; «Evaluación del Factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión de la cuenca del río Birris, Costa Rica», de E. Lianes, M. Marchamalo & M. Roldán, 2009, Revista de Agronomía, 33(2), 217-235 ; «Use of the Universal Soil Loss Equation to predict erosion in West Africa», d'E.J. Roose, 1977, actes de la conférence nationale sur l'érosion du sol ; et «Estudio de erosión para la República de Guatemala», de J. Saborío-Bejarano, 2000 dans «Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica», de F. Gómez-Delgado, 2002.

La figure 7.1 présente un tracé des coefficients de variation estimés selon différentes distributions de densité de probabilité. Cette figure fait apparaître que la distribution uniforme attribue systématiquement des valeurs supérieures aux autres distributions de probabilité, suivies de la distribution triangulaire normale et des deux distributions triangulaires. La distribution triangulaire asymétrique a été préférée aux autres car, avec la distribution triangulaire symétrique, elle a produit le coefficient de variation le plus faible ; elle représente ainsi une limite inférieure d'incertitude et constitue la seule qui prend en compte l'asymétrie des données.

Enfin, la figure 7.2 présente la distribution spatiale du facteur C de l'USLE pour la zone d'étude, d'après la carte de la couverture du sol de la figure 3.3 et les valeurs moyennes de facteur C indiquées dans le tableau 7.2.

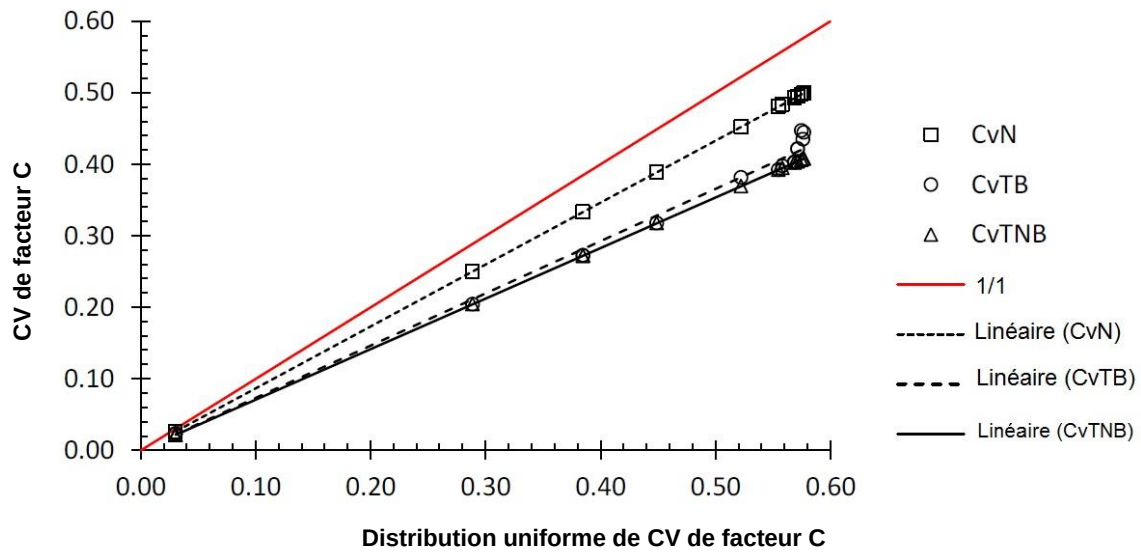


Figure 7.1. Comparaison du coefficient de variation du facteur C dans l'hypothèse de différentes distributions de densité de probabilité

Les types de sol observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan, selon la classification taxonomique des sols de l'USDA, et la zone de présence correspondante pour chaque unité géographique sont reportés dans le tableau 7.3. Des valeurs minimale et maximale du facteur C fondées sur ces catégories, ainsi que la valeur moyenne et le point intermédiaire de l'intervalle, sont indiqués dans le tableau 7.4 avec des coefficients de variation estimés pour différentes distributions de densité de probabilité.

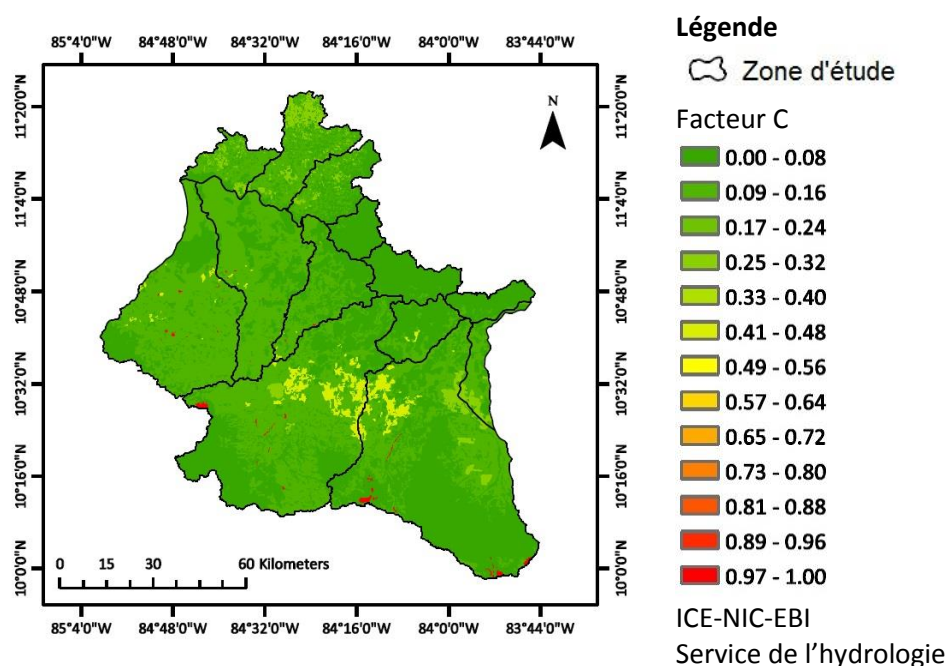


Figure 7.2. Facteur C pour la zone d'étude

Tableau 7.3. Types de sol observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan et zone correspondante pour chaque unité géographique

Code	Taxonomie des sols de l'USDA		Superficie (km ²)		
	Catégorie	Sous-catégorie	CR	NI	ZE FSJ
UIUs	Ultisols	Ustults	0.01	-----	0.01
Hi	Histosols	-----	0.21	-----	0.21
HiSa	Histosols	Saprists	3.13	-----	3.13
InUd/AnUd	Inceptisols/Andisols	Udepts/Udands	5.25	-----	5.25
EnOr/AnUd	Entisoles/Andisols	Orthents/Udands	5.78	-----	5.78
Mo	Mollisols	-----	7.12	25.97	33.09
EnPs	Entisols	Psamments	44.87	-----	44.87
EnAq/HiSa	Entisoles/Histosols	Aquents/Saprists	72.08	-----	72.08
EnAq/IcAq	Entisoles/Inceptisols	Aquents/Aquepts	78.20	-----	78.20
EnAq	Entisols	Aquents	91.90	0.18	92.08
EnOr	Entisols	Orthents	109.34	-----	109.34
Al	Alfisols	-----	-----	122.05	122.05
UIHu/InUd	Ultisols/Inceptisols	Humults/Udepts	162.87	-----	162.87
InAq	Inceptisols	Aquepts	189.85	0.07	189.92
Ox	Oxisols	-----	-----	226.60	226.60
En	Entisols	-----	66.34	171.79	238.13
AnUs	Andisols	Ustands	286.28	-----	286.28
In	Inceptisols	-----	48.76	251.03	299.79
AnUd/UIHu	Andisols/Ultisols	Udands/Humults	397.18	-----	397.18
InUd	Inceptisols	Udepts	969.94	-----	969.94
UIUd/InUd	Ultisols/Inceptisols	Udults/Udepts	1 191.32	-----	1 191.32
UI	Ultisols	-----	96.17	1 264.92	1 361.09
UIHu	Ultisols	Humults	1 408.84	0.43	1 409.27
AnUd	Andisols	Udands	1 489.49	-----	1 489.49
UIUd	Ultisols	Udults	2 679.00	0.11	2 679.12

Note : ZE FSJ = zone d'étude du fleuve San Juan ; CR = Costa Rica, NI = Nicaragua

Tableau 7.4. Types de sol observés dans les bassins des affluents du fleuve San Juan et facteur d'érodibilité moyen, intermédiaire, maximum et minimum correspondants, avec le coefficient de variation associé, compte tenu de différentes distributions de densité de probabilité

Code	Valeurs limites		CTD		Coefficient de variation CV			
	Min	Max	Moyen	Intermédiaire	DU	DTS	DTA	DN
UlUs	0,009	0,024	0,014	0,017	0,262	0,186	0,223	0,227
Hi	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
HiSa	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
InUd/AnUd	0,009	0,025	0,017	0,017	0,272	0,192	0,192	0,235
EnOr/AnUd	0,017	0,020	0,019	0,019	0,047	0,033	0,033	0,041
Mo	0,022	0,022	0,022	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000
EnPs	0,006	0,006	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
EnAq/HiSa	0,001	0,023	0,012	0,012	0,529	0,374	0,374	0,458
EnAq/IcAq	0,009	0,025	0,020	0,017	0,272	0,192	0,167	0,235
EnAq	0,023	0,023	0,023	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000
EnOr	0,017	0,020	0,019	0,019	0,047	0,033	0,033	0,041
Al	0,017	0,024	0,020	0,021	0,099	0,070	0,072	0,085
UlHu/InUd	0,009	0,025	0,015	0,017	0,272	0,192	0,220	0,235
InAq	0,025	0,025	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000
Ox	0,006	0,006	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
En	0,006	0,025	0,017	0,016	0,354	0,250	0,229	0,306
AnUs	0,019	0,019	0,019	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000
In	0,017	0,017	0,017	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000
AnUd/UlHu	0,012	0,014	0,013	0,013	0,044	0,031	0,031	0,038
InUd	0,009	0,025	0,017	0,017	0,272	0,192	0,192	0,235
UlUd/InUd	0,009	0,025	0,016	0,017	0,272	0,192	0,205	0,235
Ul	0,009	0,024	0,014	0,017	0,262	0,186	0,223	0,227
UlHu	0,012	0,014	0,013	0,013	0,044	0,031	0,031	0,038
AnUd	0,009	0,019	0,013	0,014	0,206	0,166	0,166	0,179
UlUd	0,009	0,024	0,015	0,017	0,262	0,205	0,205	0,227

Note : Min = valeur minimale ; Max = valeur maximale ; DTC = descripteurs de tendance centrale ; PII = point intermédiaire d'intervalle ; DU = distribution uniforme ; DTS = distribution triangulaire symétrique ; DTA = distribution triangulaire asymétrique (valeur moyenne en tant que vertex central) ; DN = distribution normale. Basé sur « Evaluación de los estados de la erosión hídrica de los suelos de Costa Rica: Informe técnico N° 2-E », de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO], 1989.

Tout comme la figure 7.1, la figure 7.3 montre une comparaison entre les coefficients de variation attribués pour chaque type de sol. A l'instar du cas précédent, la distribution triangulaire symétrique a été choisie par rapport aux autres facteurs pour les mêmes raisons que celles exposées ci-dessus. Enfin, une distribution spatiale du facteur K de l'USLE sur la zone d'étude est présentée sur la figure 7.4.

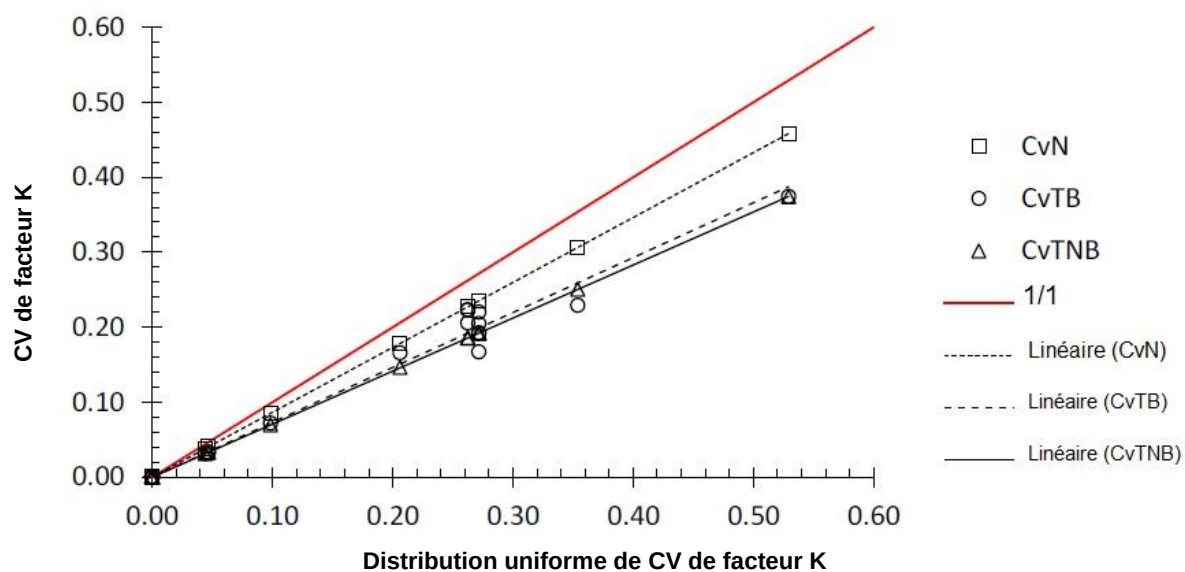


Figure 7.3. Comparaison du coefficient de variation de l'érodibilité dans l'hypothèse de différentes distributions de densité de probabilité

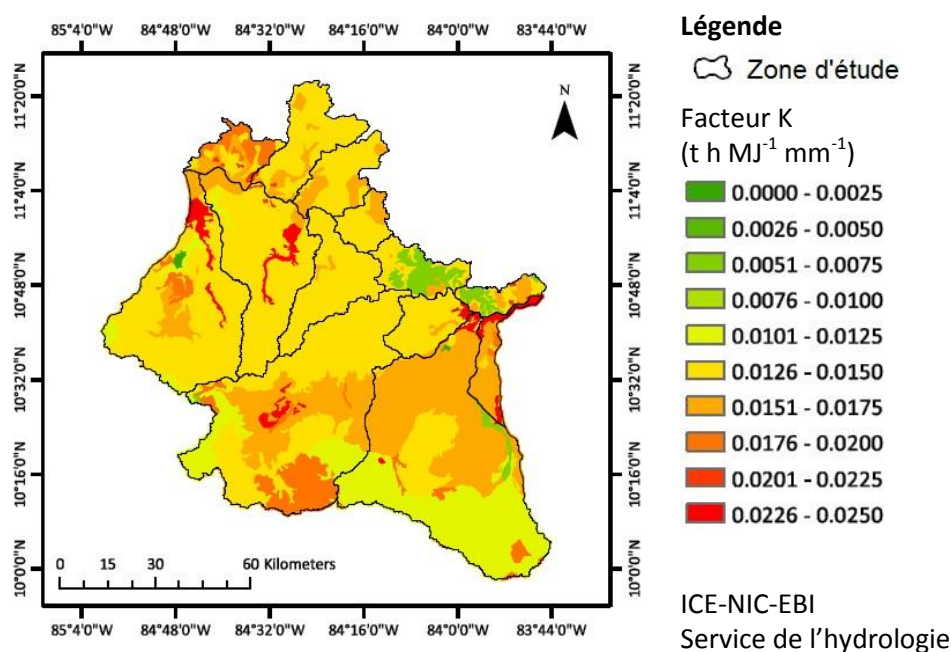


Figure 7.4. Facteur K dans la zone d'étude

Le facteur R d'érodibilité de l'USLE a été estimé à partir d'une équation empirique dérivée au moyen d'informations de précipitations provenant de 52 stations météorologiques situées sur la pente septentrionale costa-ricienne (tableau 3.1). Une fonction puissance a été adaptée à partir de la méthode des moindres carrés, et des intervalles de confiance et de prévision de 95 % ont été estimés pour chaque cas dans le but de quantifier l'incertitude (voir la figure 7.5).

La fonction ainsi estimée a ensuite été appliquée au champ de précipitations présenté sur la figure 3.5 afin de créer un champ de facteur R. Une distribution spatiale de cette variable est représentée sur la figure 7.6.

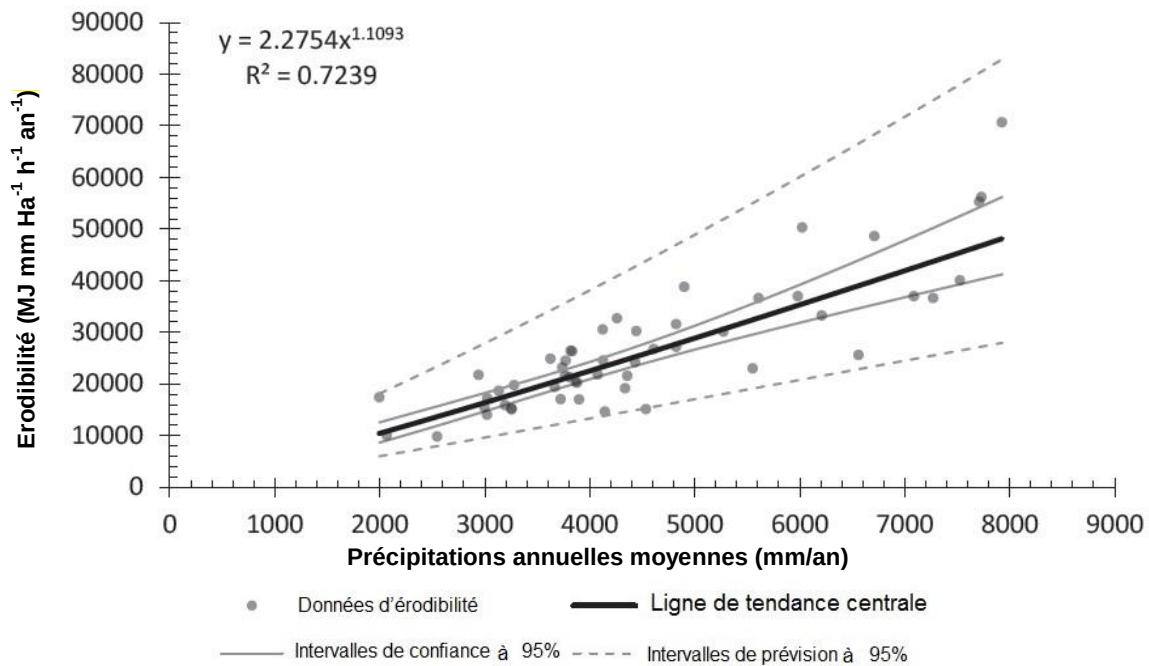


Figure 7.5. Facteur R en fonction des précipitations annuelles moyennes pour la zone d'étude

L'on note que le champ de facteur R ressemble au champ de précipitations — une évidence, puisque l'un est une fonction de l'autre — mais, en raison de la composante puissance de la fonction empirique utilisée, le champ de facteur R tend à présenter une asymétrie spatiale supérieure à celle des précipitations. En outre, un champ d'écart-type a été calculé en partant de l'hypothèse que les intervalles de prévision de 95 % de la figure 7.6 constituent des limites minimale et maximale pour une fonction de densité de probabilité triangulaire asymétrique avec le vertex central au niveau de la ligne de tendance centrale.

Enfin, le facteur LS de l'USLE a été estimé selon Bradbury (1995, p. 36-37). Les valeurs de longueur de pente ont été limitées à 300 m pour prendre en compte le fait qu'au-delà de cette distance, l'écoulement en nappe se transforme généralement en un flot concentré peu profond s'écoulant dans les rigoles de drainage, les petites rigoles et les ravines. La distribution spatiale du facteur LS de l'USLE est représentée sur la figure 7.7, pour laquelle une échelle logarithmique a été utilisée à de simples fins de visualisation.

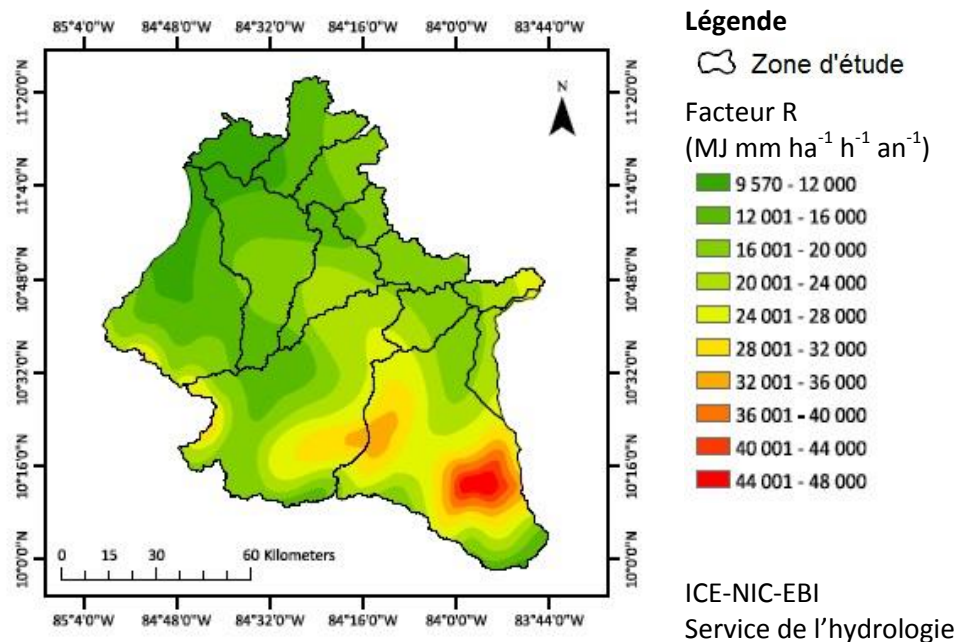


Figure 7.6. Facteur R dans la zone d'étude

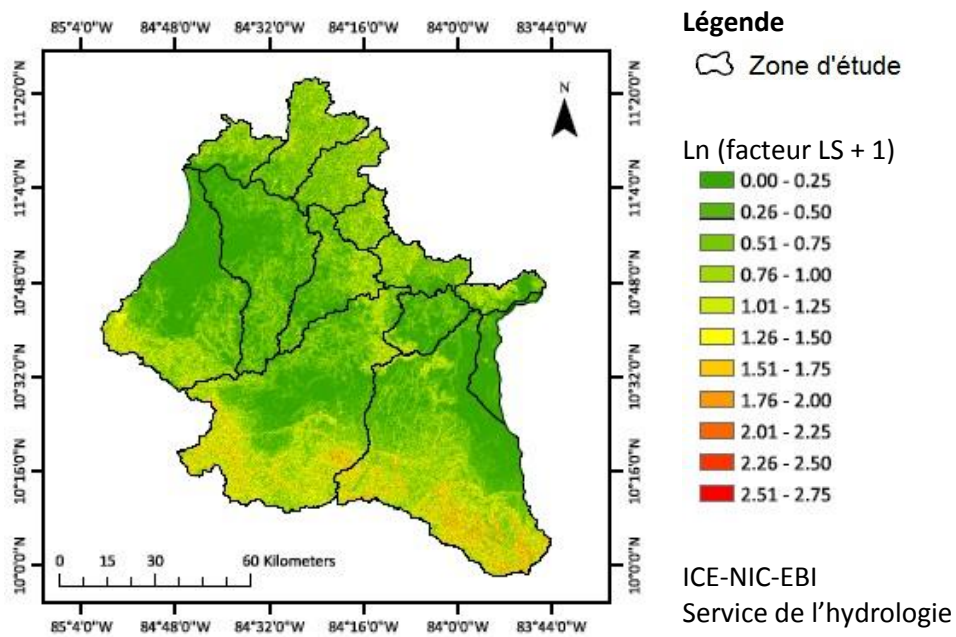


Figure 7.7. Facteur LS dans la zone d'étude

7.2. Erosion potentielle sur la base du modèle USLE et de l'analyse d'incertitude

Les informations spatiales provenant de la section 7.1 (facteur C, facteur K, facteur R et facteur LS) ont été utilisées comme entrées pour le modèle USLE, et l'érosion potentielle a été estimée pour la zone d'étude (voir la figure 7.8).

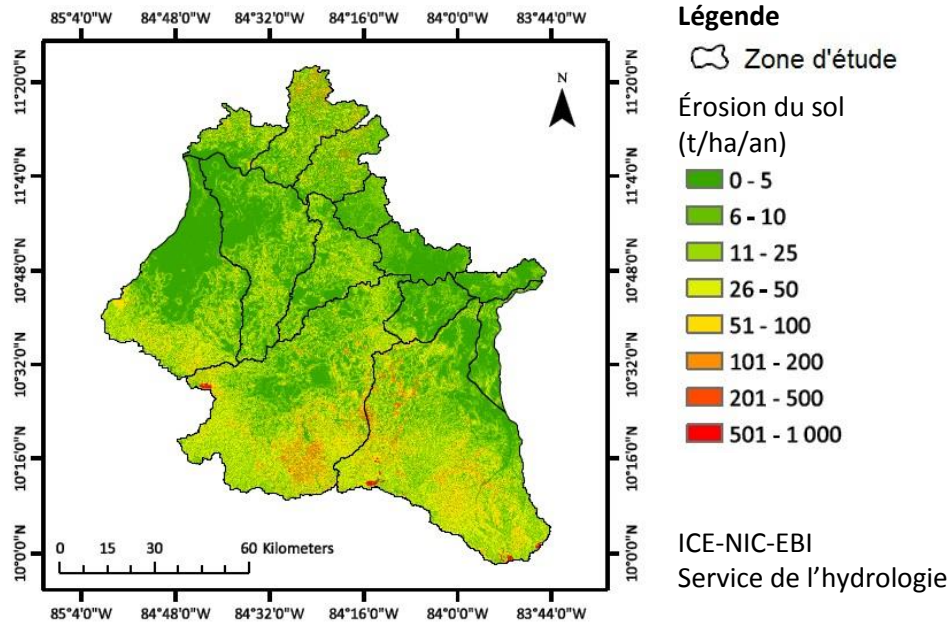


Figure 7.8. Erosion potentielle dans la zone d'étude

L'incertitude en termes d'érosion a été quantifiée par le biais d'une méthode de dérivées partielles selon Singh, Jain & Tyagy (2007). Théoriquement, la variance d'une fonction à plusieurs variables $Y(X) = Y(x_1, x_2, \dots, x_n)$ avec des variables indépendantes pourrait être estimée ainsi :

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \quad \text{ec. 8}$$

σ étant la variance empirique, X le vecteur de variables et n la longueur de ce vecteur. Dans le cas spécifique de l'équation de l'USLE, ec. 8 devient

$$\sigma_E^2 = \sum_{i=1}^{n \text{ cells}} \frac{[(C_i K_i R_i)^2 \sigma_{LS_i}^2 + (C_i K_i LS_i)^2 \sigma_{R_i}^2 + (C_i LS_i R_i)^2 \sigma_{K_i}^2 + (LS_i K_i R_i)^2 \sigma_{C_i}^2]}{n \text{ cells}} \quad \text{ec. 9}$$

Les variances pour les facteurs C et K ont été extraites du tableau 7.2 et du tableau 7.4, et une fonction de variance de facteur R a été estimée sur la base de la figure 7.5, en posant l'hypothèse d'une distribution triangulaire asymétrique avec vertex central situé dans la ligne de tendance centrale de la fonction précipitations annuelle moyenne-érodibilité, les valeurs minimale et maximale étant situées dans des intervalles de confiance de 95 % de la fonction. Enfin, la variance du facteur LS n'a pas été intégrée dans les calculs, car aucune information ni méthode objective ne permettait de la calculer.

En posant l'hypothèse que C, K et R ont suivi une distribution triangulaire asymétrique et que la variance du facteur LS est égale à zéro (car aucune conclusion n'a été tirée à ce sujet), ec.9 devient une limite inférieure pour la variance d'érosion potentielle modélisée.

L'érosion potentielle a été estimée selon deux méthodes différentes. Pour la première, des valeurs spatiales moyennes ont été prises pour chacun des principaux bassins indiqués dans le tableau 7.5 et les calculs ont été effectués à l'échelle du bassin. Pour la seconde, les calculs ont été réalisés à l'échelle d'une cellule, puis intégrés dans la zone de chaque bassin. Le tableau 7.5 montre que les deux méthodes ont produit des résultats différents pour la valeur moyenne E et le coefficient de variation CV.

Tableau 7.5. Estimations de l'érosion potentielle sur la base de méthodes de modèles agrégés et distribués

Bassin	Facteurs moyens de l'USLE				M1		M2	
	C	K	LS	R	ES	CV	ES	CV
Las Banderas	0,022	0,013	0,91	22 300	5,67	3,43	4,73	1,067
Machado	0,020	0,010	1,05	18 500	3,97	3,29	3,86	0,902
Barlota	0,020	0,015	1,35	16 700	6,49	3,52	6,73	0,596
Santa Cruz	0,065	0,015	1,25	16 500	19,92	1,40	19,73	0,159
Sábalos	0,109	0,015	1,14	14 100	25,39	1,13	26,02	0,088
Melchora	0,091	0,018	0,91	10 100	14,80	0,91	16,19	0,148
San Carlos	0,095	0,015	1,31	21 200	40,20	0,69	30,20	0,039
Cureña	0,055	0,014	0,51	20 300	7,72	1,16	7,21	0,442
Sarapiquí	0,084	0,014	1,45	26 800	47,00	0,76	32,80	0,045
Chirripó	0,105	0,018	0,20	21 500	8,11	1,06	6,86	0,480
Frío	0,089	0,015	0,72	15 000	14,51	0,83	13,74	0,082
Pocosol	0,086	0,016	0,46	15 100	9,19	0,90	9,38	0,142
Infiernito	0,070	0,014	0,80	18 600	14,93	1,17	12,79	0,193
Zone d'étude	0,083	0,015	1,06	19 900	25,92	0,52	21,58	0,029

Note : ES = érosion du sol (t/ha/an) ; CV = coefficient de variation ; M1 = première méthode utilisée pour calculer l'ES, consistant à calculer la moyenne et le coefficient de variation avec les valeurs agrégées des facteurs de l'USLE ; M2 = seconde méthode utilisée pour calculer l'ES, consistant à calculer la moyenne et le coefficient de variation au moyen des facteurs de l'USLE distribués.

Il convient de noter que le coefficient de variation diminue avec la méthode du modèle distribué par rapport à celle du modèle agrégé, et que la valeur moyenne de l'érosion potentielle fluctue d'un cas à l'autre mais tend à être supérieure dans le premier. Ces informations laissent supposer que la méthode distribuée est préférable à celle agrégée, car cette dernière ne tient pas compte de la variabilité spatiale des paramètres pour chaque bassin.

7.3. Méthode d'étalonnage

Un indice de dépôt a été estimé d'après Bradbury (1995, p. 40-43). L'indice de dépôt se définit comme le rapport entre la capacité de transport et l'apport de sédiments. Ainsi :

«si la capacité de transport est élevée, mais l'apport de sédiments faible, la valeur ID est très élevée, ce qui indique que tous les sédiments disponibles seront transportés. Si la capacité de transport et l'apport de sédiments sont élevés tous les deux, les valeurs d'indice de dépôt seront d'un niveau intermédiaire, car la capacité à transporter tous les sédiments peut être insuffisante. Si l'apport de sédiments est élevé et la capacité de transport faible, l'indice de dépôt est très bas.» (Bradbury, 1995, p. 20.)

Conformément à Bradbury (1995, p. 41), l'indice de dépôt a été défini comme suit à partir d'études de laboratoire réalisées par Govers (1990) et des études empiriques d'Amphlet et Dickinson (1989) :

$$DI = \frac{P_a^{2.32} \min\{A^{0.66} S^{1.44}\}}{SE} \quad \text{ec. 10}$$

Pa représentant les précipitations annuelles en mm, A la zone de drainage en pixel, S la pente en degrés, $\min\{\}$ la valeur minimale pour le trajet de l'écoulement descendant, et ES l'érosion du sol en tonne/ha/an. En outre, une valeur de pente minimale de 1 a été sélectionnée sur la base d'une recommandation faite par Bradbury, selon laquelle

«dans les fonds de vallée en pente douce, un écoulement de surface important forme des cours d'eau reliés au système fluvial principal. En l'absence d'hypothèse, nombre de zones de pente à temps d'écoulement élevés seront déconnectées du réseau fluvial principal en raison des faibles valeurs de pente dans les fonds de vallée.» (Bradbury, 1995, p. 42.)

Le champ d'indice de dépôt (ID) estimé selon ces hypothèses est présenté dans la figure 7.9.

L'apport sédimentaire est égal au produit de l'érosion potentielle et d'une valeur d'un ratio de dépôt (RD). RD étant une fonction de l'ID, les pixels avec le ratio capacité de transport/apport de sédiments le plus élevé donneront théoriquement un RD maximal, tandis que des pixels avec un ratio capacité de transport/apport de sédiments faible déboucheront sur des valeurs de RD peu élevées.

Une fonction de dépôt a été étalonnée pour minimiser les erreurs quadratiques entre les productions de sédiments observées et celles obtenues à partir du modèle d'érosion. Etant donné que l'ID définit une partition sur le champ d'érosion, le problème se réduit à un système linéaire sur l'ID, car tous les éléments sur chaque partition du champ d'érosion sont multipliés pour la même valeur RD ; ainsi, la somme d'érosions multipliée par un RD(ID) spécifique reste constante bien que la fonction RD proprement-dite varie. En d'autres termes

$$SY = \sum_E DR(DI)E = \sum_{i=0}^{255} \left[DR(i) \sum_{E \in DI=i} E \right] \quad \text{ec. 11}$$

et des histogrammes pour la distribution de densité d'érosion potentielle empirique, comme celle présentée à la figure 7.10, ont été élaborés pour chacun des 14 bassins d'étalonnage (présentés dans le tableau 3.5) et utilisés ultérieurement dans le cadre du processus d'étalonnage.

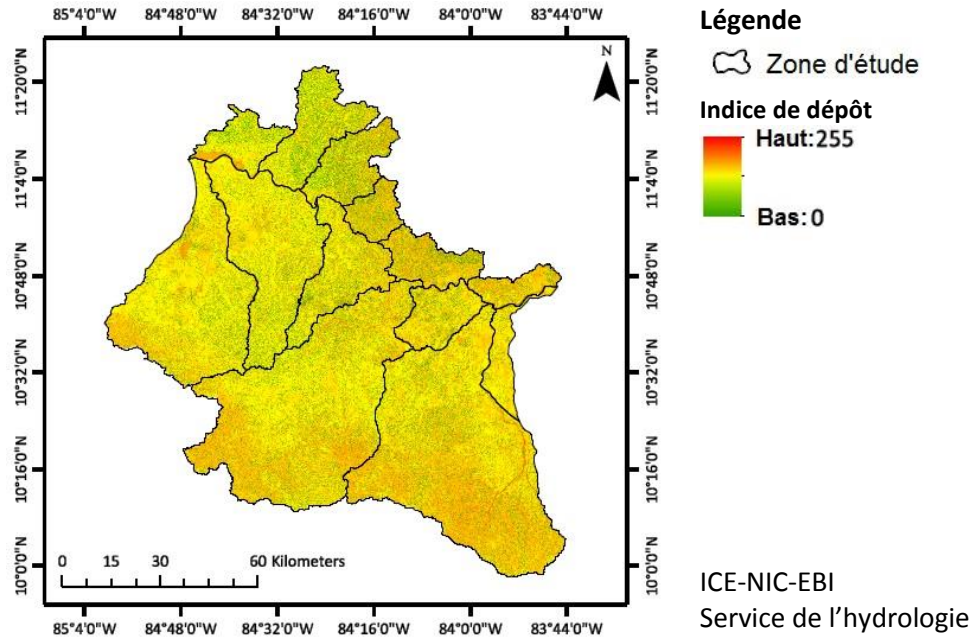


Figure 7.9. Indice de dépôt dans la zone d'étude

Une somme pondérée des erreurs quadratiques (SPEQ) a été utilisée en tant que fonction objective durant les processus d'optimisation. Les pondérations ont été définies comme suit,

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\sup\{relative\ error_j\} - \inf\{relative\ error_j\})}{n(\sup\{relative\ error_i\} - \inf\{relative\ error_i\})} \quad \text{ec. 12}$$

sup et *inf* étant respectivement la borne supérieure et la borne inférieure de chaque sous-catégorie, *n* correspondant au nombre de bassins d'étalonnage, et les *erreurs relatives* étant extraites du tableau 4.2. Ainsi, les bassins présentant les intervalles de confiance les plus bas (représentés ici en tant qu'anomalies) ont été pondérés par des coefficients supérieurs, et des valeurs présentant une plus grande incertitude (relative) se sont vues attribuer une moindre importance dans le processus d'étalonnage.

Conformément à Bradbury (1995, Appendice D), une fonction de dépôt séquentielle a été testée en tant que première approximation, et l'optimisation évolutive a été utilisée pour minimiser la fonction objective ; dans le cas présent, SPEQ = 3,74 et NE = 0,94. Une seconde fonction de dépôt (linéaire) a été testée et a débouché sur une fonction RD constante (la valeur de pente était égale à zéro), avec la SPEQ en baisse de 3,74 à 2,49 et le NE en hausse de 0,94 à 0,96. Les fonctions de dépôt ainsi étalonnées sont représentées sur la figure 7.11 avec l'histogramme de la figure 7.10.

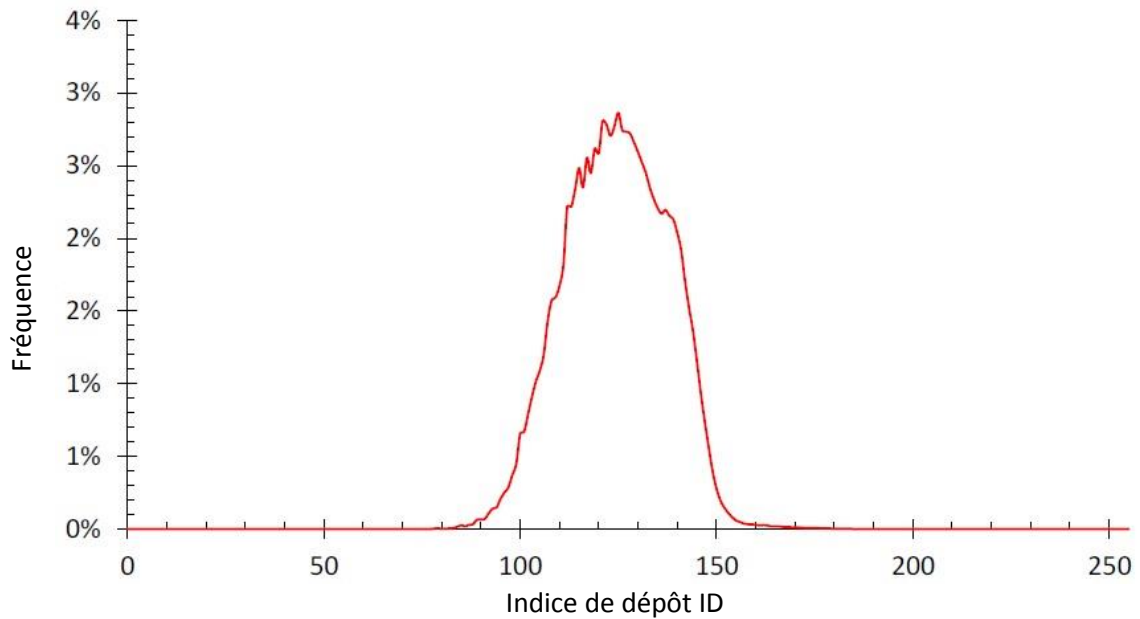


Figure 7.10. Distributions de densité de l'érosion potentielle empirique en fonction de l'indice de dépôt pour la zone d'étude

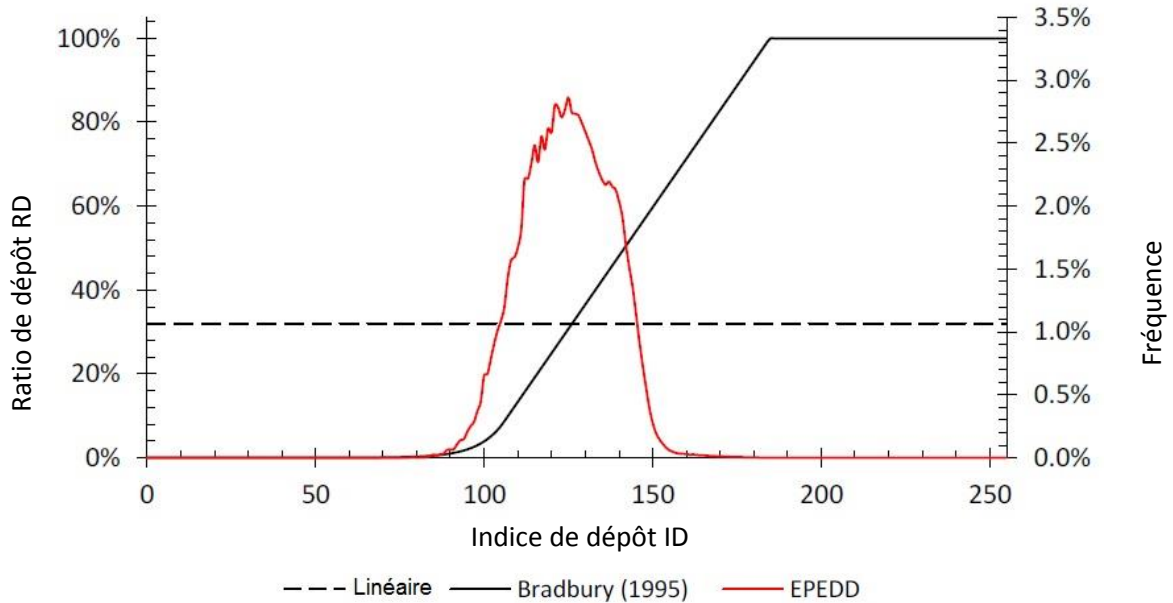


Figure 7.11. Fonction de dépôt étalonnée pour la somme pondérée minimale des erreurs quadratiques

Comme le montre la figure 7.11, la fonction proposée par Bradbury est quelque peu restrictive, en ce qu'elle fixe des valeurs de ratio de dépôt basses et élevées aux extrêmes du domaine de fonction ; ainsi, une ligne droite doit relier ces valeurs minimales et maximales pour garantir la continuité, quel que soit l'aspect de la distribution d'érosion potentielle. En revanche, la distribution d'érosion potentielle ressemble à une distribution normale, la plupart des valeurs d'érosion étant situées au centre du domaine ID avec des valeurs de fréquence similaires et pratiquement aucune asymétrie ; au vu de ces éléments, une valeur RD constante pour cette zone à *distribution symétrique* soumise à l'érosion semble correcte. Ainsi, la fonction linéaire a été choisie en tant que fonction de dépôt, et des estimations d'apport sédimentaire ont été calculées pour l'ensemble de la zone d'étude.

Des valeurs observées et modélisées pour les quatorze points de contrôle sont indiquées dans le tableau 7.6 et sur la figure 7.12. On note que la concordance entre les données observées et modélisées tend à augmenter à mesure que la zone de drainage augmente. Cette condition spécifique est idéale car le modèle d'érosion a été élaboré pour produire un bilan sédimentaire des principaux bassins dont les eaux sont drainées directement par le bassin du fleuve San Juan.

Tableau 7.6. Méthode d'étalonnage pour la production de sédiments en suspension

COD	FPE	ZD (km ²)	ESSM (t/ha/an)	ESM (t/an)	ASSM (t/an)	ASSO (t/an)
SJR ^a	0,34	11 479	21,57	24 756 000	7 604 000	8 490 000
1203	2,13	841	30,71	2 584 000	794 000	161 000
1204	0,52	195	64,93	1 263 000	388 000	86 000
1206	0,69	41	45,99	187 000	57 000	12 000
1211	0,47	59	27,91	166 000	51 000	22 000
1213	0,24	17	30,61	53 000	16 000	2000
1402	1,08	538	39,28	2 115 000	650 000	215 000
1404	0,69	1 552	36,59	5 680 000	1 745 000	1 175 000
1405	1,48	297	25,56	760 000	233 000	141 000
1420	0,87	124	28,42	352 000	108 000	130 000
1602	2,24	241	25,39	613 000	188 000	55 000
1605	1,24	34	29,56	100 000	31 000	3000
Bsa	1.00	2771	32.78	9 085 000	2 791 000	2 342 000
BSC	1.00	2643	30.19	7 980 000	2 451 000	2 928 000

Note : COD = code de la station ; FPE = facteur de pondération d'erreur ; ZD = zone de drainage ; ESSM = érosion de sédiments spécifiques modélisée ; ESM = érosion de sédiments modélisée ; ASSM = apport de sédiments en suspension modélisé ; ASSO = apport de sédiments en suspension observé.

^a Charge en suspension dans l'hypothèse où 90 % du débit du fleuve San Juan passe dans le fleuve Colorado. Les sédiments apportés au réseau par le lac sont extraits de la charge des sédiments en suspension, car il s'agit d'une composante externe au réseau.

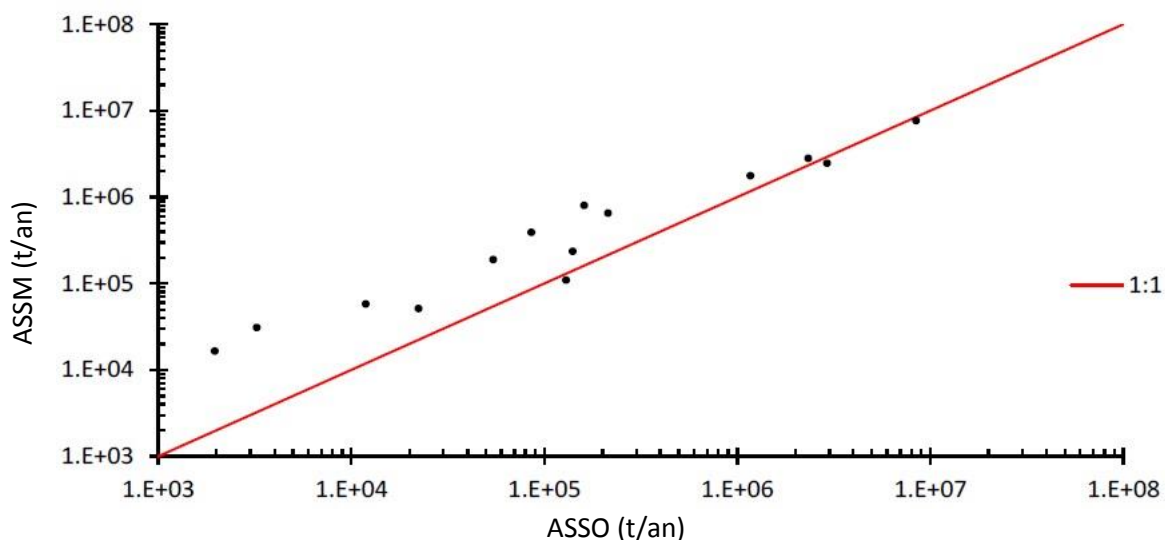


Figure 7.12. Comparaison des apports de sédiments en suspension modélisés (ASSM) et observés (ASSO)

7.4. Apport sédimentaire

La fonction constante du RD calculée dans la section précédente a été appliquée au champ d'érosion potentiel du sol présenté sur la figure 7.8 afin de produire un champ d'apport sédimentaire pour l'ensemble de la zone d'étude. La distribution spatiale de l'apport sédimentaire est présentée sur la figure 7.13.

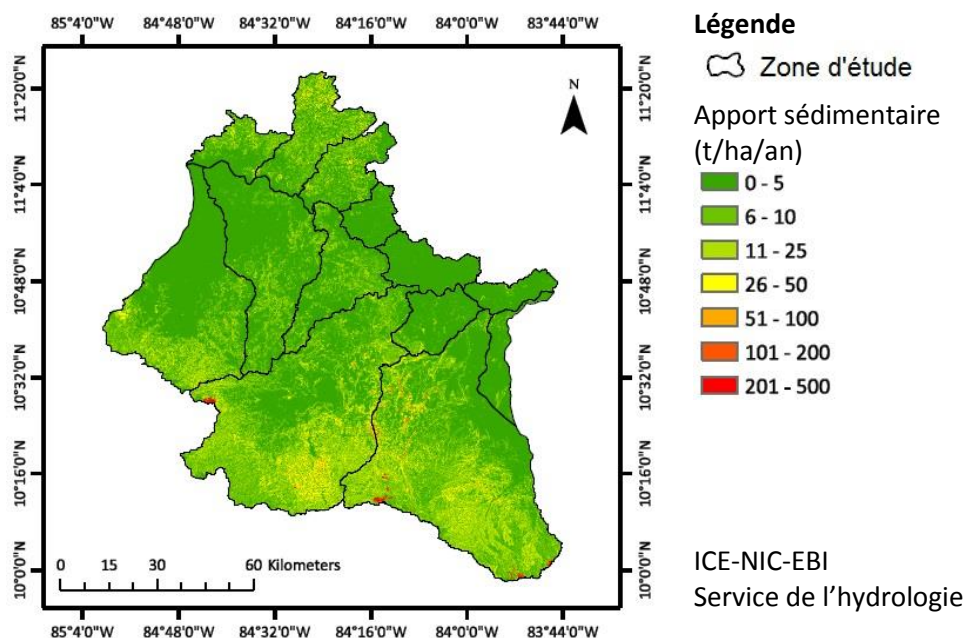


Figure 7.13. Apport sédimentaire dans la zone d'étude

Les estimations de l'érosion du sol et de l'apport sédimentaire sont présentées dans le tableau 7.7. Il importe de garder à l'esprit qu'en raison du ratio d'apport constant utilisé pour transformer l'érosion du sol en apport sédimentaire, l'analyse d'incertitude reste valable pour l'apport sédimentaire, et les coefficients de variation présentés dans le tableau 7.5 peuvent être appliqués directement aux résultats présentés dans le tableau 7.7.

Tableau 7.7. Erosion potentielle du sol et apport sédimentaire pour les principaux bassins dont les eaux sont drainées directement par le fleuve San Juan

Bassin	ZD (km ²)	ESS (t/ha/an)	ES (t/an)	ASS (t/ha/an)	AS (t/an)
Bassin Melchora	305	16,19	494 000	4,97	152 000
Bassin Sábalos	571	26,02	1 486 000	7,99	456 000
Bassin Santa Cruz	418	19,73	825 000	6,06	253 000
Bassin Barlota	219	6,73	147 000	2,07	45 000
Bassin Machado	352	3,86	136 000	1,19	42 000
Bassin Las Banderas	198	4,73	94 000	1,45	29 000
Bassin Frío	1577	13,74	2 167 000	4,22	666 000
Bassin Pocosol	1224	9,38	1 148 000	2,88	353 000
Bassin Infiernillo	609	12,79	779 000	3,93	239 000
Bassin San Carlos	2642	30,20	7 979 000	9,28	2 451 000
Bassin Cureña	353	7,21	254 000	2,21	78 000
Bassin Sarapiquí	2770	32,80	9 087 000	10,07	2 791 000
Bassin Chirripó	236	6,86	162 000	2,11	50 000
Zone d'étude	11 474	21,58	24 758 000	21,58	7 605 000

Note : ZD = zone de drainage ; ESS = érosion spécifique du sol ; ES = érosion du sol ; ASS = apport sédimentaire spécifique ; AS = apport sédimentaire.

8. BILAN SÉDIMENTAIRE

Un bilan sédimentaire a été élaboré à partir des résultats présentés dans les sections précédentes et des rapports préparés par Oreamuno-Vega & Villalobos-Herrera (2014) et Mende (2014). La production sédimentaire du bassin du fleuve San Juan a été estimée sur la base du modèle d'érosion décrit au chapitre 7, tandis que les incréments de sédiments dus à la construction de la route 1856 ont été calculés d'après les taux d'érosion d'Oreamuno-Vega & Villalobos-Herrera et l'inventaire des pentes de Mende.

Pour les estimations d'érosion de la plate-forme de la route, les taux d'érosion et les largeurs de route figurant dans le tableau 8.1 ont été considérés comme valables pour l'ensemble de la route sur la base du jugement expert de M. Mende.

Tableau 8.1. Taux d'érosion pour la plate-forme de la route

Matériau de la plate-forme de la	Largeur de la route (m)	Taux d'érosion pour les pentes douces (m/an)	Taux d'érosion pour les pentes abruptes (m/an)
Graviers	10	0,0014 ^b	0,0044 ^b
Poussière	10	0,0140 ^a	0,0440 ^a
Piste	5	0,0028 ^c	0,0088 ^c

^a Basé sur le «Rapport sur l'hydrologie et les sédiments des bassins hydrographiques costa-riciens dont les eaux sont drainées par le fleuve San Juan», de F. Gómez-Delgado, J. J. Leitón-Montero & C. A. Aguilar-Cabrera, 2013. ^b Hypothèse d'un taux d'érosion de piste de 10 %. ^c Hypothèse d'un taux d'érosion de piste de 20 %.

Les incréments de charge solide (par bassin) dus à la construction de la route 1856 ont été calculés à partir des taux d'érosion et des largeurs de route du tableau 8.1, ainsi que des taux d'érosion publiés par Oreamuno-Vega & Villalobos-Herrera et des données SIG fournies par M. Mende. L'hypothèse d'un ratio d'apport de 0,60 a été posée selon Gómez-Delgado *et al* (2013). Les résultats sont présentés dans le tableau 8,2 et la figure 8.1.

Tableau 8.2. Incréments de la charge solide, par bassin, dus à la construction de la route 1856

Bassin	LR (km)	Érosion (m³)				Érosion totale (t/an)
		EPR	ETD	ETR	Total	
Principaux bassins hydrographiques costa-riciens déversant directement leurs eaux dans le fleuve San Juan						
Bassin Infiernito	41,0	855	12 348	19 051	32 253	53 863
Bassin San Carlos	11,1	173	253	399	825	1378
Bassin Cureña	29,5	387	1738	8966	11 091	18 521
Bassin Sarapiquí	4,5	172	49	-----	221	369
Bassin Chirripó	22,8	192	190	107	489	817
Zone du Costa Rica déversant directement ses eaux dans le fleuve San Juan						
Total	108.8	1 778	14 578	28 523	44 879	74 949

Note : LR = longueur de la route ; EPR = érosion de la plate-forme de la route ; ETD = érosion des talus de déblai ; ETR = érosion des talus de remblai.

De la même manière, les incréments de la charge solide (par portion) dus à la construction de la route 1856 ont été calculés au moyen de cette méthodologie et des mêmes informations de base. Les résultats sont présentés dans le tableau 8.3 et sur la figure 8.2.

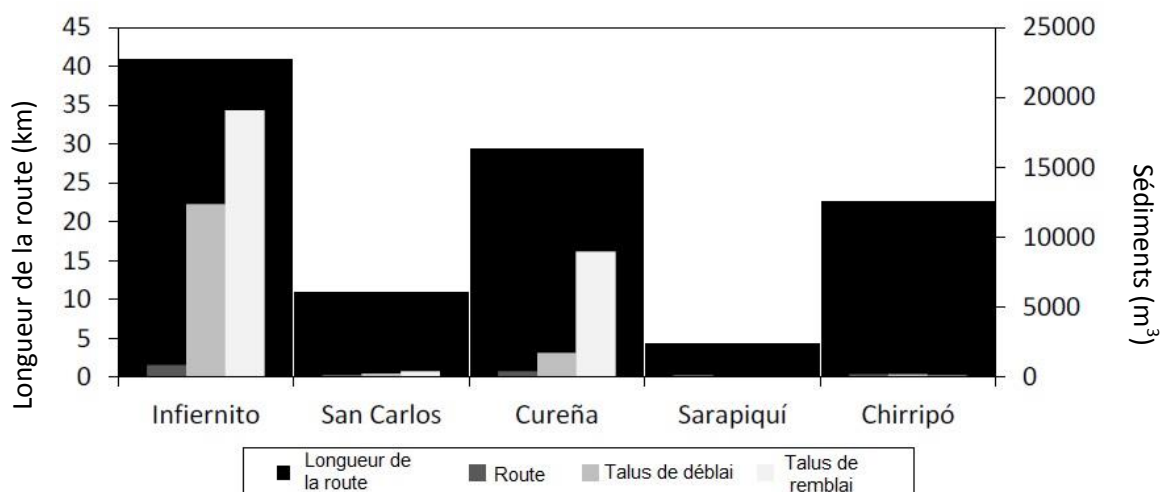


Figure 8.1. Incréments de la charge solide, par bassin, dus à la construction de la route 1856

Tableau 8.3. Incréments de la charge solide, par portion, dus à la construction de la route 1856

Portion entre les fleuves	Longueur de la route (km)	Érosion (m³)			Érosion totale (t/an)
		Route	Pentes	Total	
Principaux fleuves costa-riciens dont les eaux sont directement drainées par le fleuve San Juan					
Pocosol-Infiernito	14,2	375	12 323	12 698	21 205
Infiernito-San Carlos	27,8	569	19 075	19 644	32 825
San Carlos-Cureña	15,4	129	2 809	2938	4907
Cureña-Sarapiquí	28,2	511	8547	9058	15 127
Sarapiquí-Chirripó	1,7	14	347	361	603
Chirripó-Colorado	21,5	181	0	181	302
Zone costa-ricienne dont les eaux s'écoulent directement dans le fleuve San Juan					
Total	108.8	1778	43 102	44 880	74 949

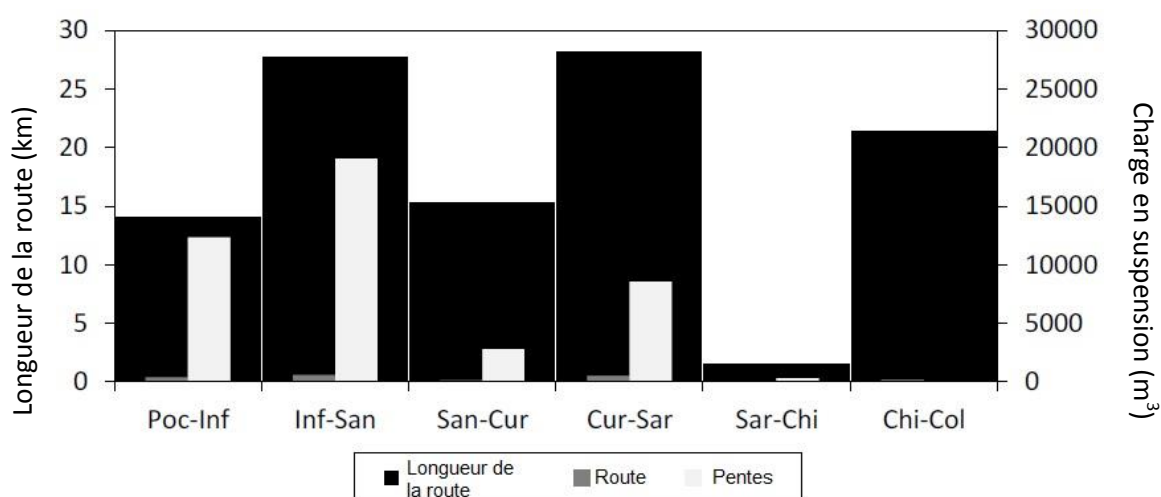


Figure 8.2. Incréments de la charge solide, par portion, dus à la construction de la route 1856

Les estimations de l'apport sédimentaire pour chacun des principaux bassins dont les eaux sont directement drainées par le fleuve San Juan ont été ajustées de manière à obtenir une conservation de la masse. La charge en suspension provenant du lac Nicaragua a été supposée égale à 588 000 t/an.

Les estimations concernant l'embouchure des fleuves Sarapiquí et San Carlos (tableau 6.1) et celles concernant le fleuve San Juan (tableau 6.2) ont été utilisées comme points de contrôle, et les différences entre les charges solides annuelles moyennes modélisées sur la base de l'USLE et des séries temporelles ont été redistribuées proportionnellement à l'apport sédimentaire entre les bassins restants. Les valeurs d'apports sédimentaires modélisés et ajustés sont présentées dans le tableau 8.4.

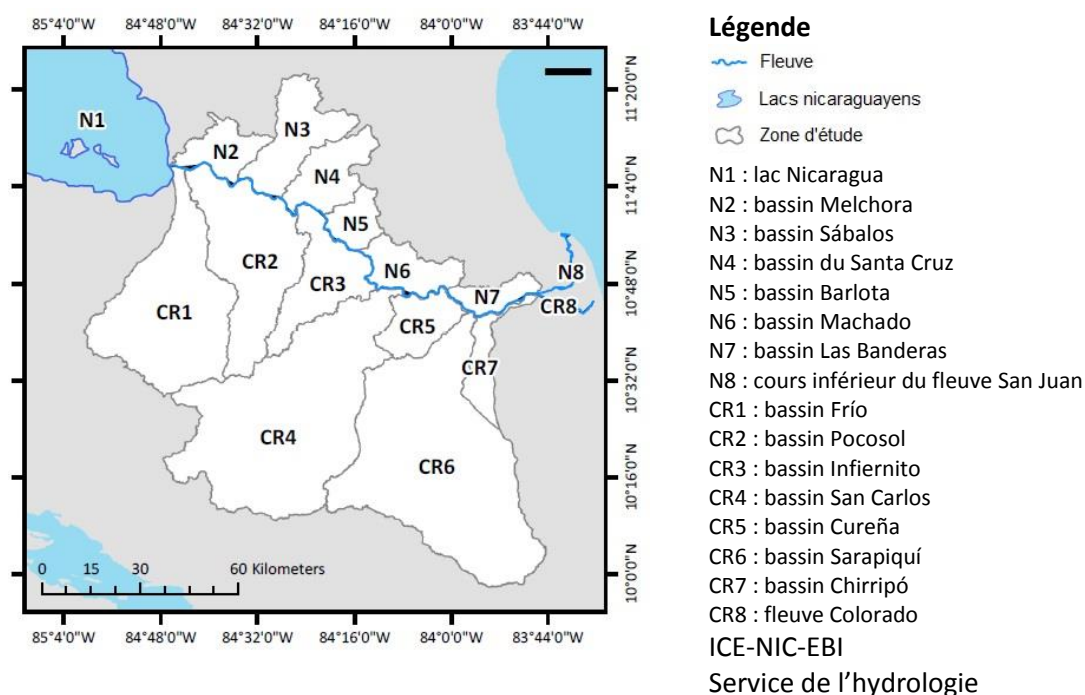
Tableau 8.4. Bilan sédimentaire ajusté pour le réseau du bassin du fleuve San Juan

Bassin	ZD (km²)	ASS (t/ha/an)	Erosion (t/an)	AS (t/an)	ASA (t/an)
Bassin Melchora	305	16,19	494 000	152 000	207 000
Bassin Sábalos	571	26,02	1 486 000	456 000	622 000
Bassin Santa Cruz	418	19,73	825 000	253 000	345 000
Bassin Barlota	219	6,73	147 000	45 000	62 000
Bassin Machado	352	3,86	136 000	42 000	57 000
Bassin Las Banderas	198	4,73	94 000	29 000	39 000
Bassin Frío	1 577	13,74	2 167 000	666 000	907 000
Bassin Pocosal	1 224	9,38	1 148 000	353 000	481 000
Bassin Infiernillo	609	12,79	779 000	239 000	326 000
Bassin San Carlos	2 642	30,20	7 979 000	2 451 000	2 928 000
Bassin Cureña	353	7,21	254 000	78 000	106 000
Bassin Sarapiquí	2 770	32,80	9 087 000	2 791 000	2 342 000
Bassin Chirripó	236	6,86	162 000	50 000	68 000
Zone d'étude	11 474	21,58	24 758 000	7 605 000	8 490 000
Lac Nicaragua	29 067	-----	-----	-----	588 000

Note : les valeurs en gras sont celles supposées correctes ; c'est pourquoi l'erreur a été répartie dans les valeurs restantes de manière à ce que la somme totale soit égale à 8 490 000 t/an. ZD = zone de drainage ; ASS = apport sédimentaire spécifique ; AS = apport sédimentaire ; ASA = apport sédimentaire ajusté.

En raison du manque d'informations publiées sur le transport sédimentaire dans le fleuve San Juan et l'absence d'études communes sur ce fleuve, la séparation des sédiments au point Delta a été faite en partant de l'hypothèse que 90 % du débit du fleuve San Juan s'écoule par le fleuve Colorado, et les estimations des sédiments en suspension et de la charge de fond pour le fleuve San Juan (voir le tableau 6.2) ont été divisées entre le fleuve Colorado (d'après le tableau 4.1 et le tableau 5.2) et le cours inférieur du fleuve San Juan (d'après le tableau 6.3). Ces résultats, ainsi que les informations du tableau 8.4, ont été utilisés pour créer le diagramme du bilan budgétaire du bassin du fleuve San Juan présenté sur la figure 8.3.

Toutefois, il convient de préciser que, puisqu'aucune information sur les matériaux de la charge de fond n'était disponible pour l'embouchure de douze des quatorze principaux bassins dont les eaux sont directement drainées par le fleuve San Juan, et qu'aucun modèle distribué ni localisé n'avait été élaboré pour estimer indirectement cette variable spécifique, aucune autre hypothèse n'a été posée, et seule la séparation de la charge de fond au point Delta est présentée sur le diagramme.



Charge en suspension (t/an)

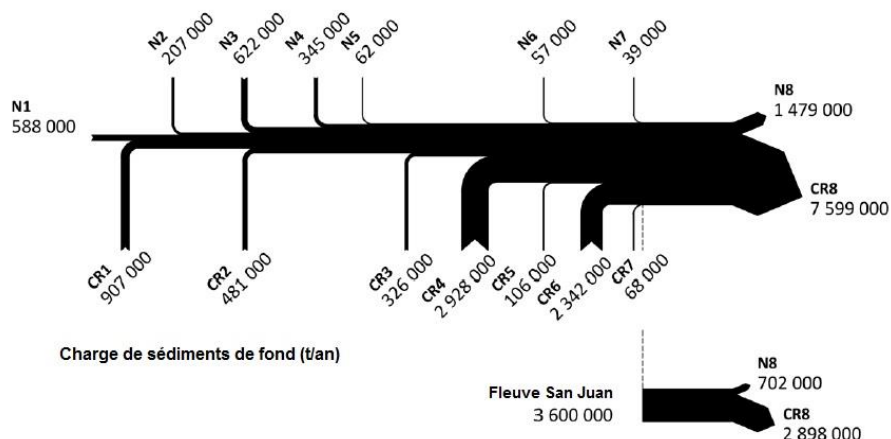


Figure 8.3. Bilan sédimentaire du bassin du fleuve San Juan (valeurs en t/an)

Différents pourcentages de matériaux grossiers ont été posés comme hypothèse pour les estimations de la charge solide annuelle de la route 1856 présentées dans le tableau 8.2 et le tableau 8.3. La séparation des sédiments pour les matériaux en suspension et les matériaux de la charge de fond a été faite respectivement d'après la figure 6.6 b) et la figure 6.7 b), et elle est présentée dans le tableau 8.5 et le tableau 8.6.

Tableau 8.5. Séparation de la charge en suspension et de la charge de fond des incréments de charges solides découlant de la construction de la route 1856, au niveau du delta pour différents pourcentages supposés de matériaux grossiers présents dans les matériaux de la route 1856 (en masse)

Charge solide	Apport sédimentaire (t)					
	PSMB = 5	PSMB = 10	PSMB = 15	PSMB = 20	PSMB = 25	PSMB = 30
En suspension						
CISJ	11 600	10 990	10 379	9 769	9 158	8 548
CFo	59 601	56 464	53 327	50 190	47 053	43 917
De fond						
CISJ	731	1 461	2 192	2 923	3 654	4 384
CFo	3 017	6 033	9 050	12 067	15 083	18 100
Total						
CISJ	12 331	12 451	12 571	12 692	12 812	12 932
CFo	62 618	62 497	62 377	62 257	62 137	62 017

Note : PSMB = pourcentage supposé d'apport sédimentaire de la route 1856 composé de matériaux [de sable] grossiers ; CISJ = cours inférieur du fleuve San Juan River ; CFo = fleuve Colorado.

Tableau 8.6. Séparation de la charge en suspension et de la charge de fond des incréments de charges solides découlant de la construction de la route 1856, au niveau du delta, pour différents pourcentages supposés de matériaux grossiers présents dans les matériaux de la route 1856 (en volume)

Charge solide	Apport sédimentaire (m ³)					
	PSMB = 5	PSMB = 10	PSMB = 15	PSMB = 20	PSMB = 25	PSMB = 30
En suspension						
CISJ	6946	6581	6215	5849	5484	5118
CFo	35 689	33 811	31 932	30 054	28 176	26 297
De fond						
CISJ	438	875	1313	1750	2188	2625
CFo	1806	3613	5419	7226	9032	10 838
Total						
CISJ	7384	7456	7528	7600	7672	7744
CFo	37496	37424	37352	37280	37208	37136

Note : PSMB = pourcentage supposé d'apport sédimentaire de la route 1856 composé de matériaux [de sable] grossiers ; CISJ = cours inférieur du fleuve San Juan River ; CFo = fleuve Colorado.

En outre, les ratios de transport sédimentaire total entre le fleuve Colorado et le cours inférieur du fleuve San Juan, pour chacun des pourcentages de matériaux grossiers susmentionnés, sont présentés sur la figure 8.4. Il convient de noter que selon cette figure ces ratios sont pratiquement identiques pour la plage de pourcentage utilisée (voir le tableau 8.5 et le tableau 8.6), car la valeur de pente de l'équation du meilleur ajustement est pratiquement égale à zéro.

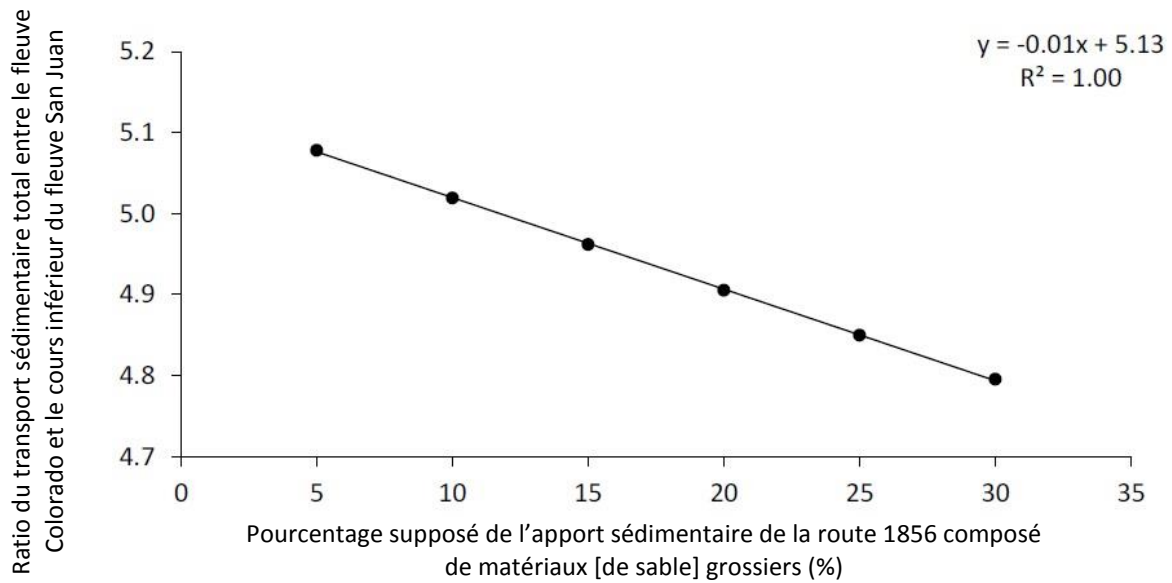


Figure 8.4. Ratio du transport sédimentaire total entre le fleuve Colorado et le cours inférieur du fleuve San Juan en fonction du pourcentage supposé d'apport sédimentaire de la route 1856 constitué de matériaux (de sable) grossiers

Si l'on pose comme hypothèses que 5 à 10 pourcent de l'apport sédimentaire provenant de la route transportés jusqu'au delta est du sable, et que le ratio du débit s'écoulant dans le cours inférieur du fleuve San Juan et le fleuve Colorado est respectivement d'un pour neuf — c'est-à-dire que 90 % du débit du fleuve San Juan s'écoule jusqu'au fleuve Colorado —, l'on peut affirmer, selon les tableaux 8.5 et 8.6, qu'en moyenne les incréments de charge solide annuelle aux exutoires du réseau sont approximativement inférieurs à 12 450 t (ou 7 460 m³) pour le cours inférieur du fleuve San Juan, et 62 620 t (ou 37 500 m³) pour le fleuve Colorado.

La figure 8.5 est une représentation graphique des incréments de charge solide annuelle moyenne découlant de la construction de la route 1856. Comme le fait apparaître le diagramme, les effets de la route 1856 sur la charge solide annuelle moyenne du fleuve San Juan ne sont pas seulement insignifiants ; ils sont, en pratique, indiscernables.

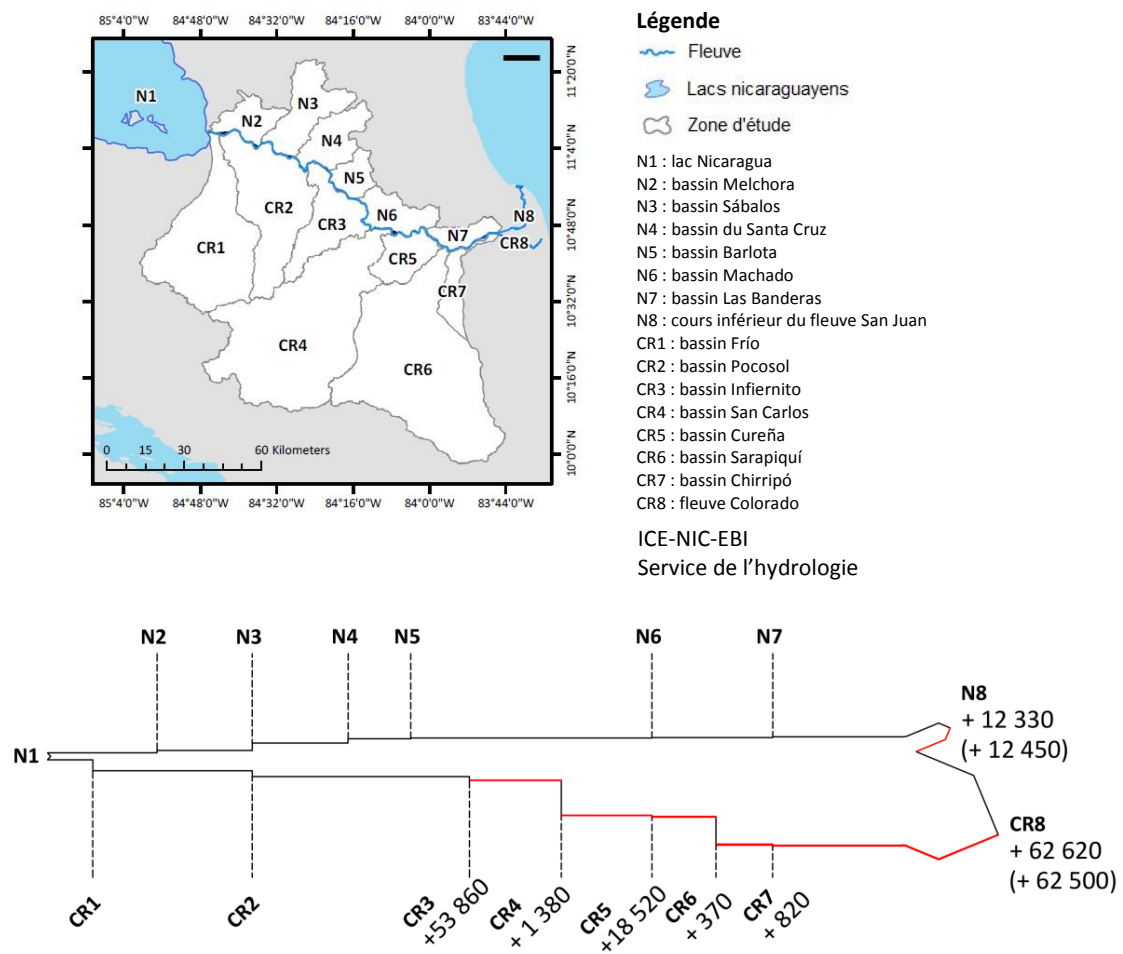


Figure 8.5. Incrément de la charge annuelle moyenne de sédiments en suspension du fleuve San Juan dû à la construction de la route 1856 dans l'hypothèse d'une fraction de matériaux grossiers égale à 5 % (les valeurs entre parenthèses correspondent à 10 %)

9. RÉFÉRENCES

[Non reproduit]

10. APPENDICE

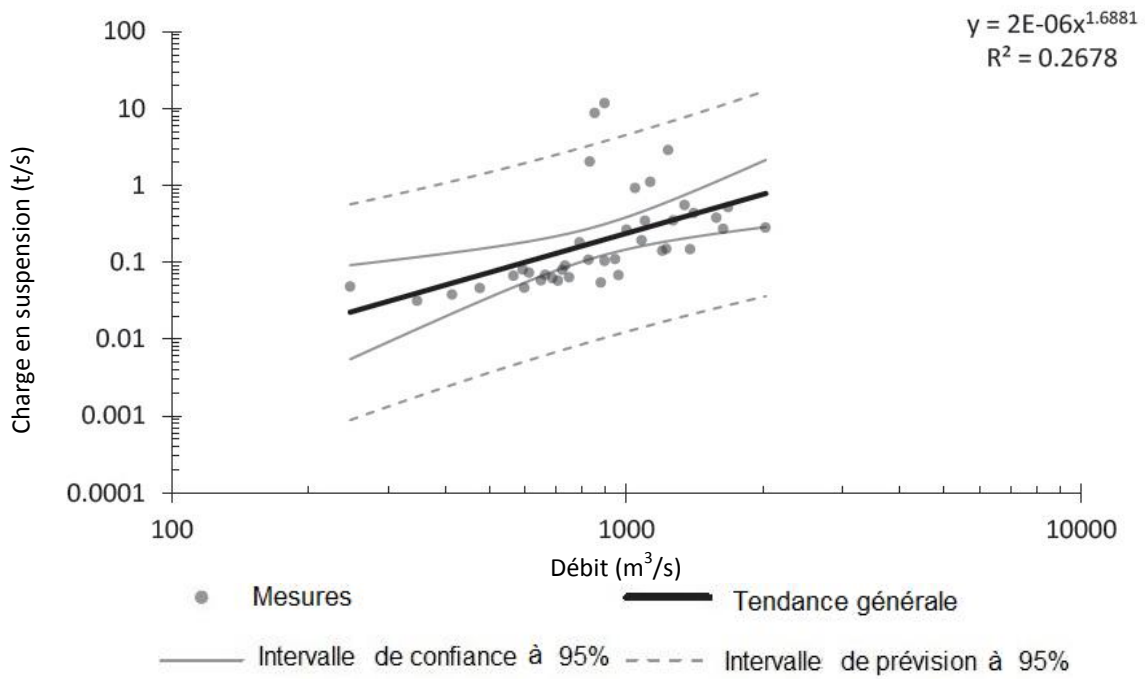


Figure 10.1. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Delta Colorado (11-04)

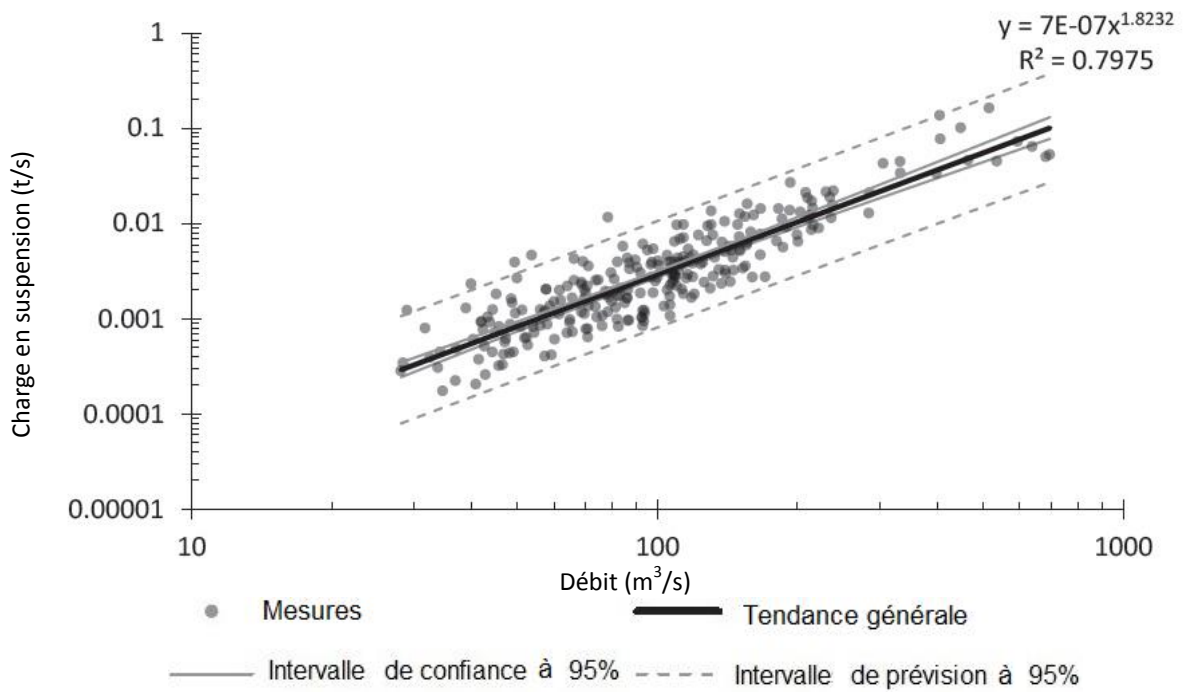


Figure 10.2. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Puerto Viejo (12-03)

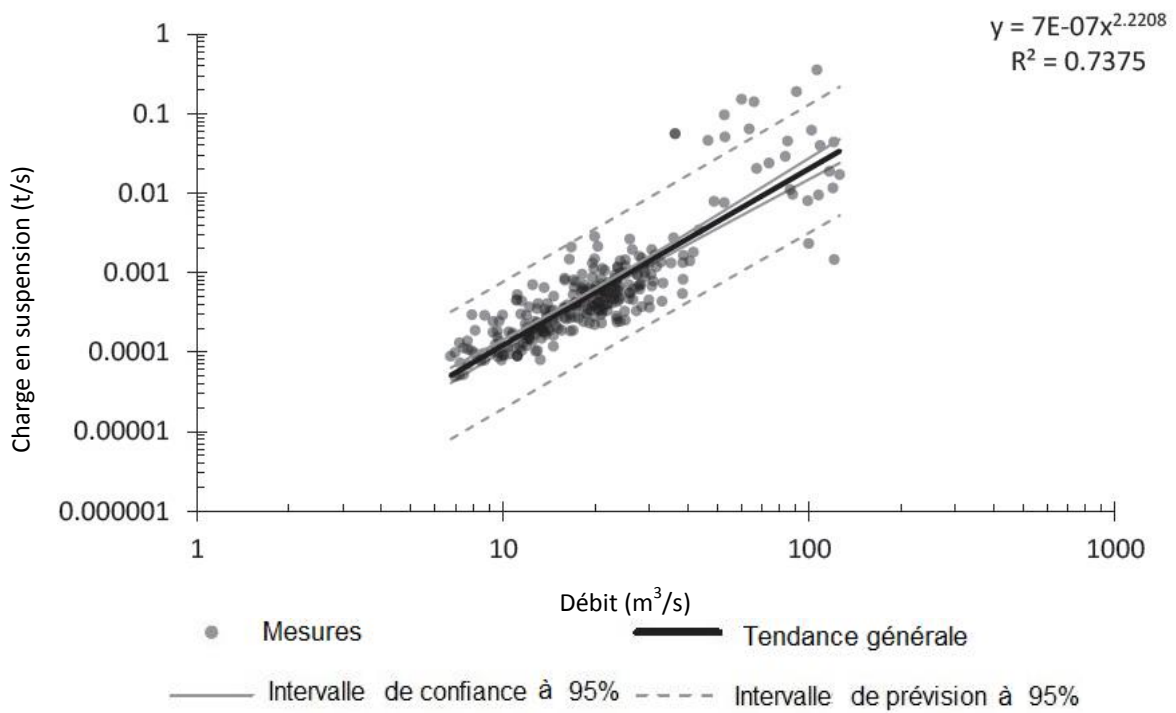


Figure 10.3. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Veracruz (12-04)

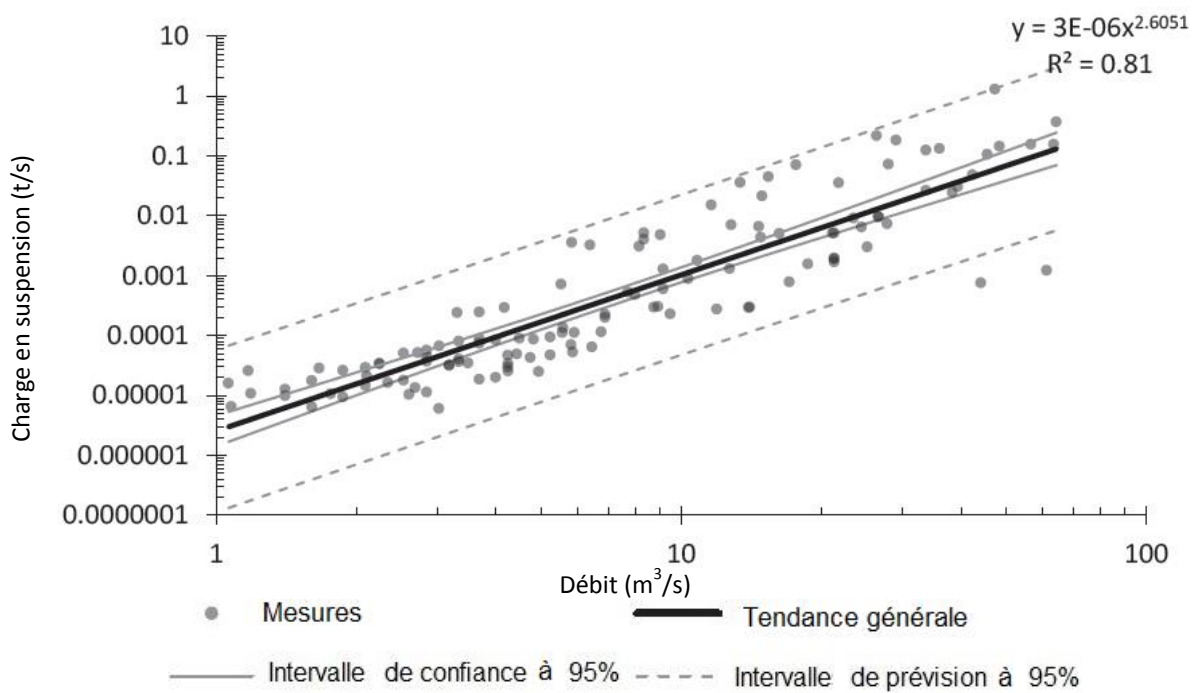


Figure 10.4. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Toro (12-06)

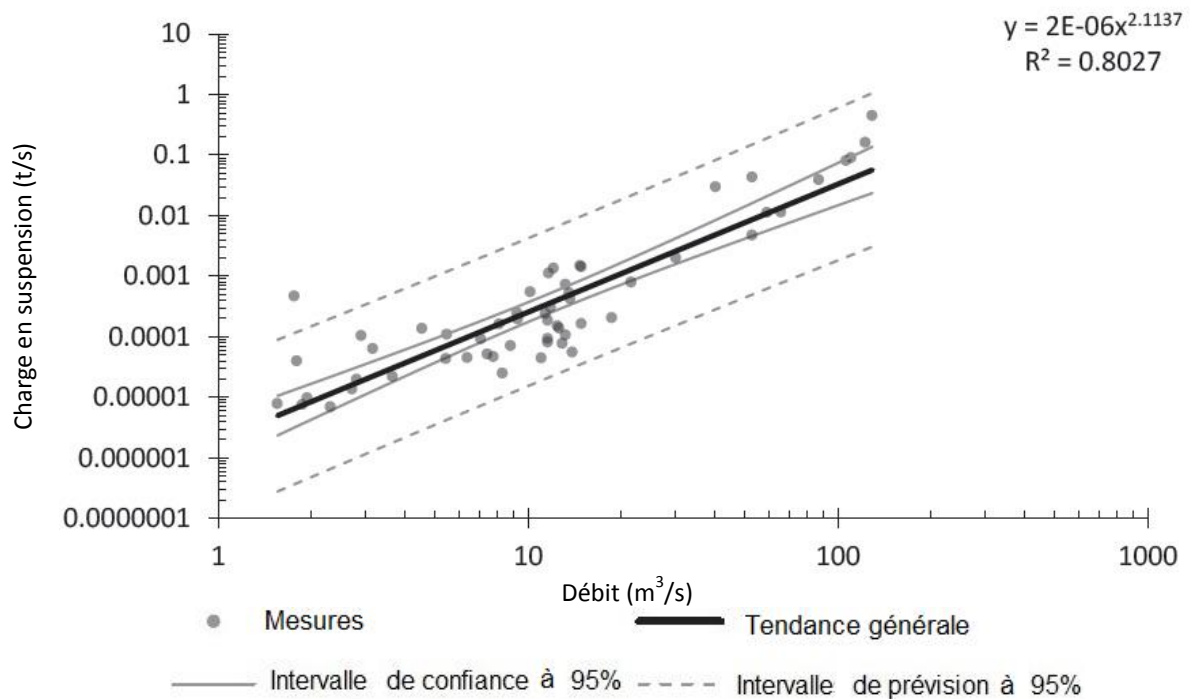


Figure 10.5. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage San Miguel (12-11)

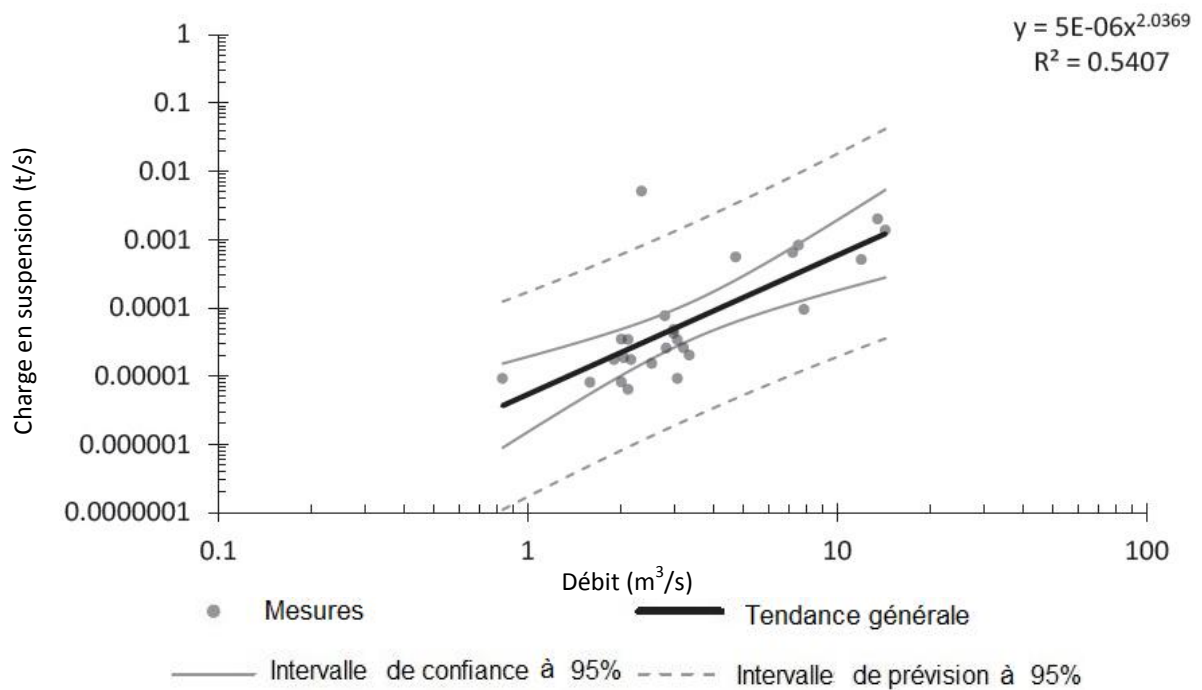


Figure 10.6. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Río Segundo (12-13)

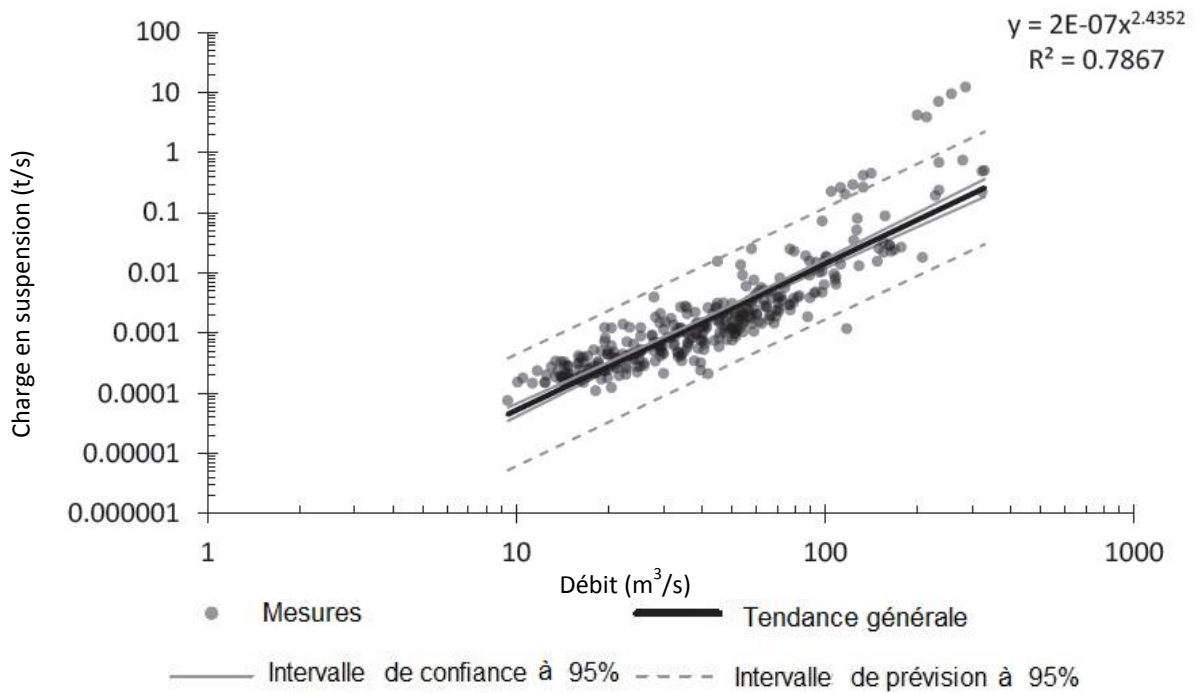


Figure 10.7. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Jabillos (14-02)

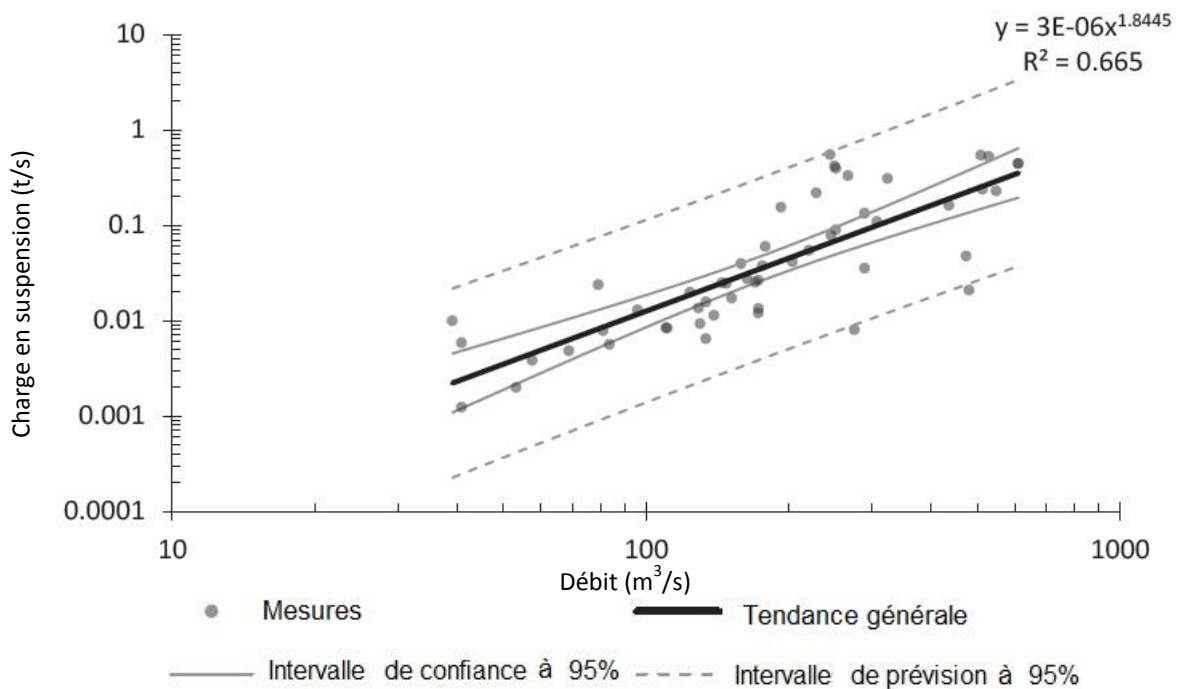


Figure 10.8. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Terrón Colorado (14-04)

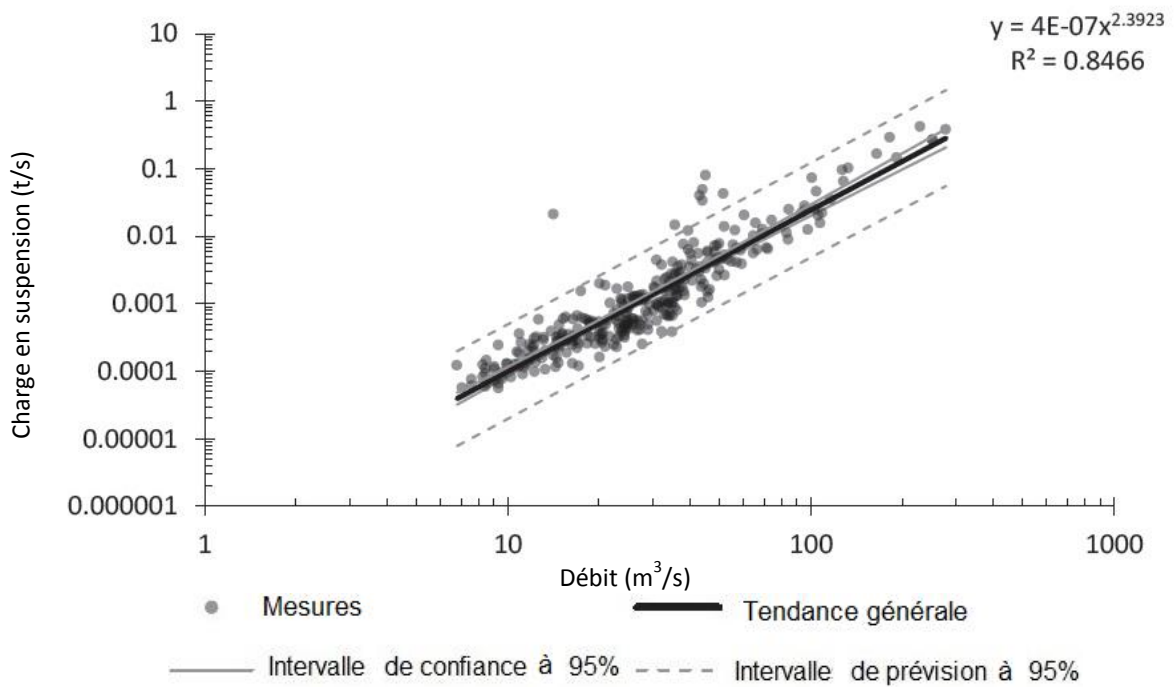


Figure 10.9. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Peñas Blancas (14-05)

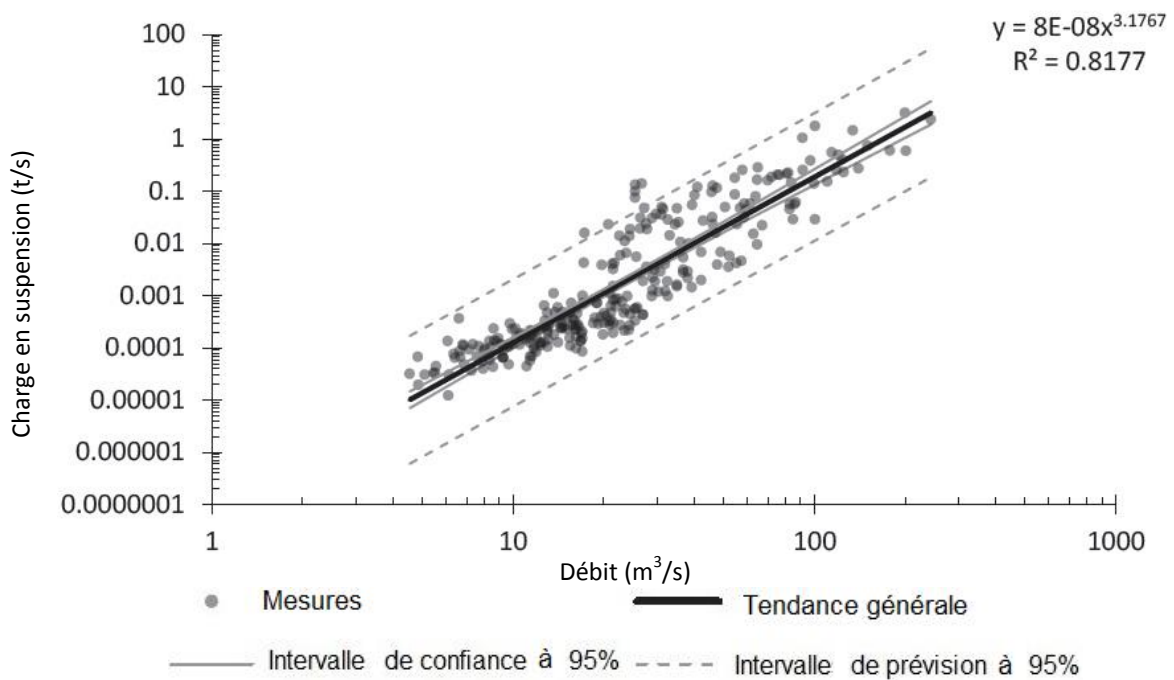


Figure 10.10. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Pocosol (14-20)

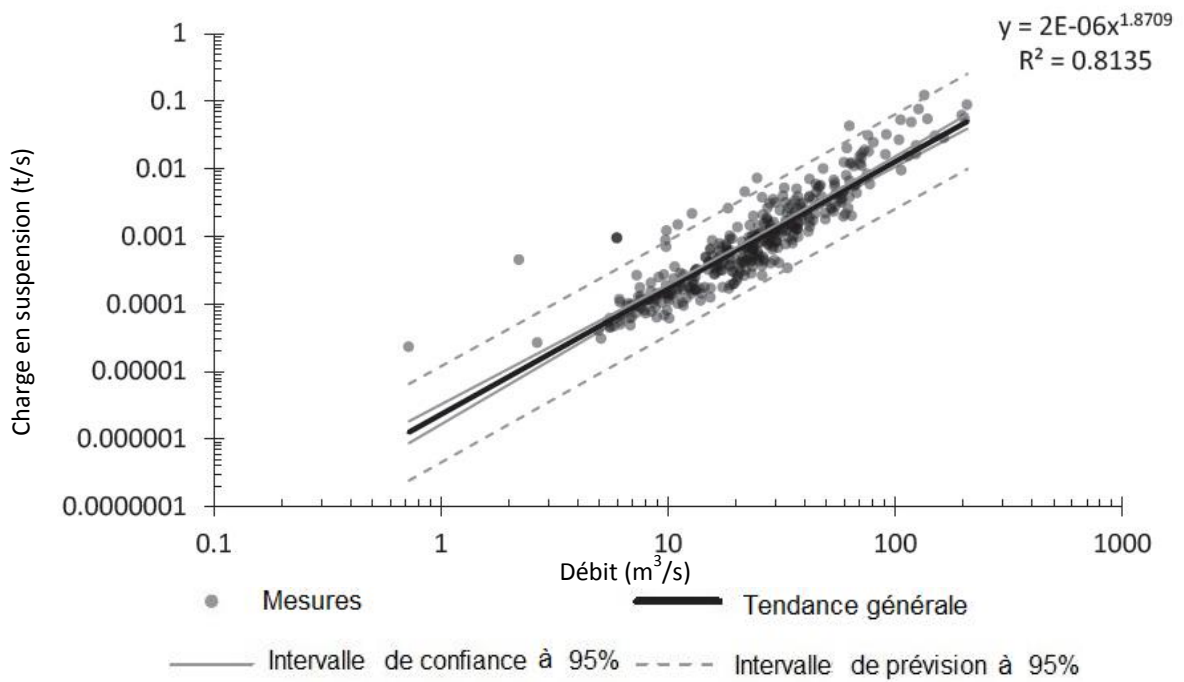


Figure 10.11. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Guatuso (16-02)

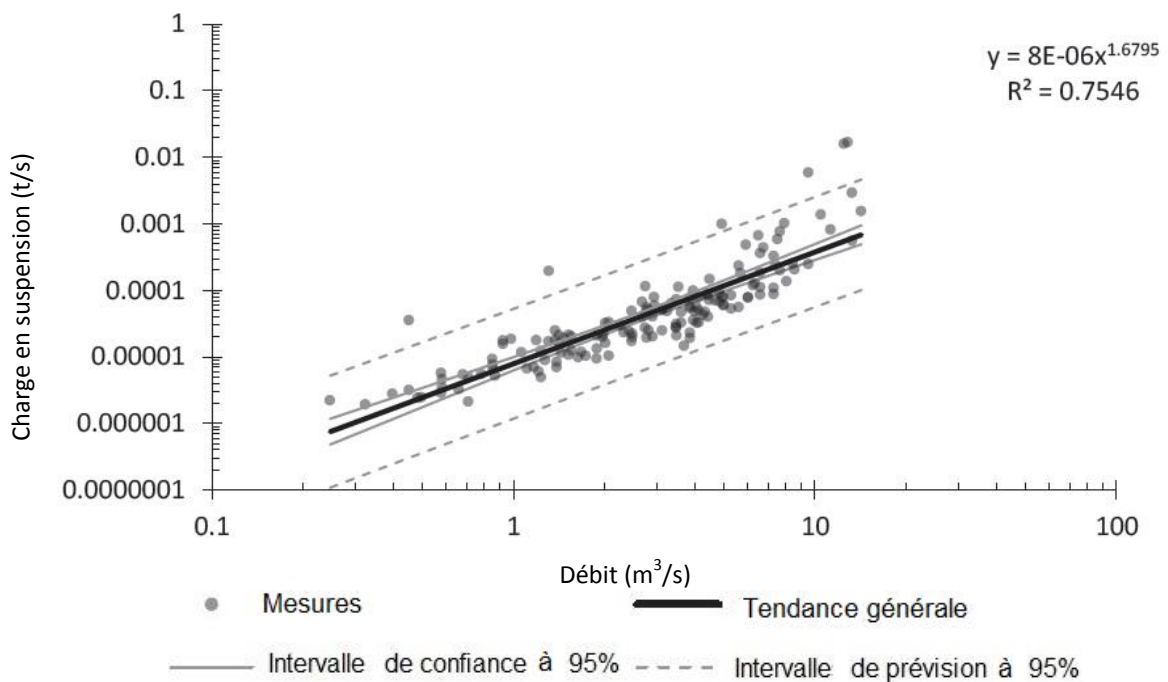


Figure 10.12. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de jaugeage Santa Lucía (16-05)

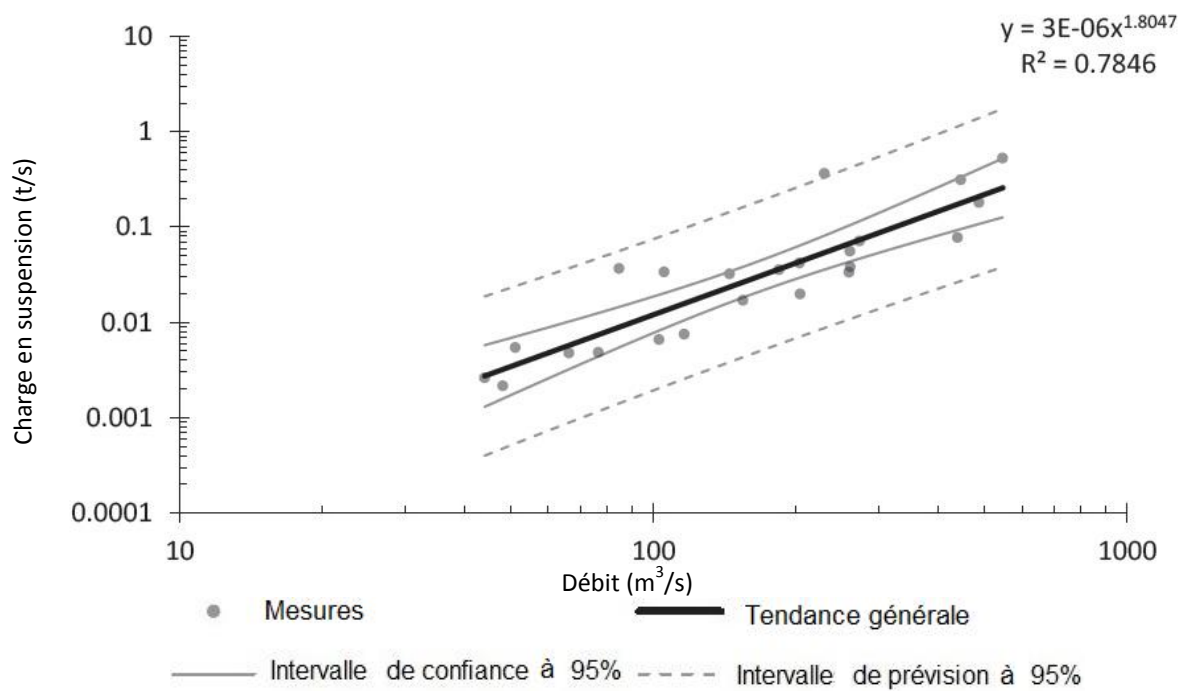


Figure 10.13. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de mesurage des sédiments San Carlos (BSC)

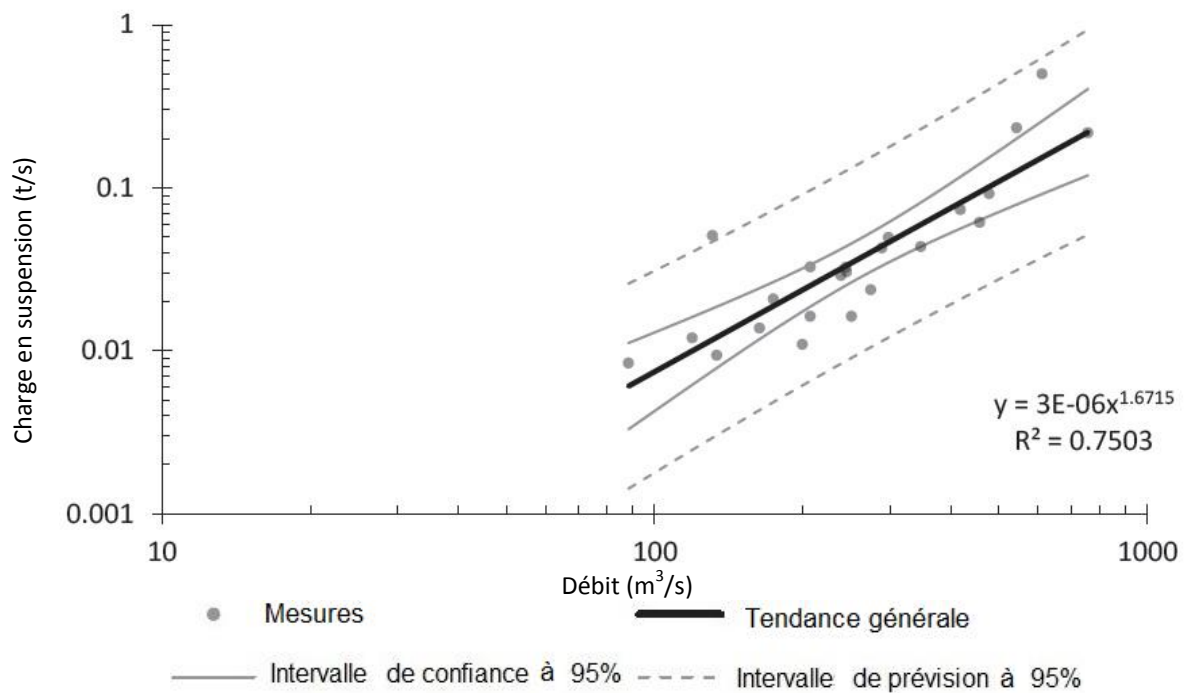


Figure 10.14. Courbe de tarage des sédiments en suspension pour la station de mesurage des sédiments Sarapiquí (BSa)

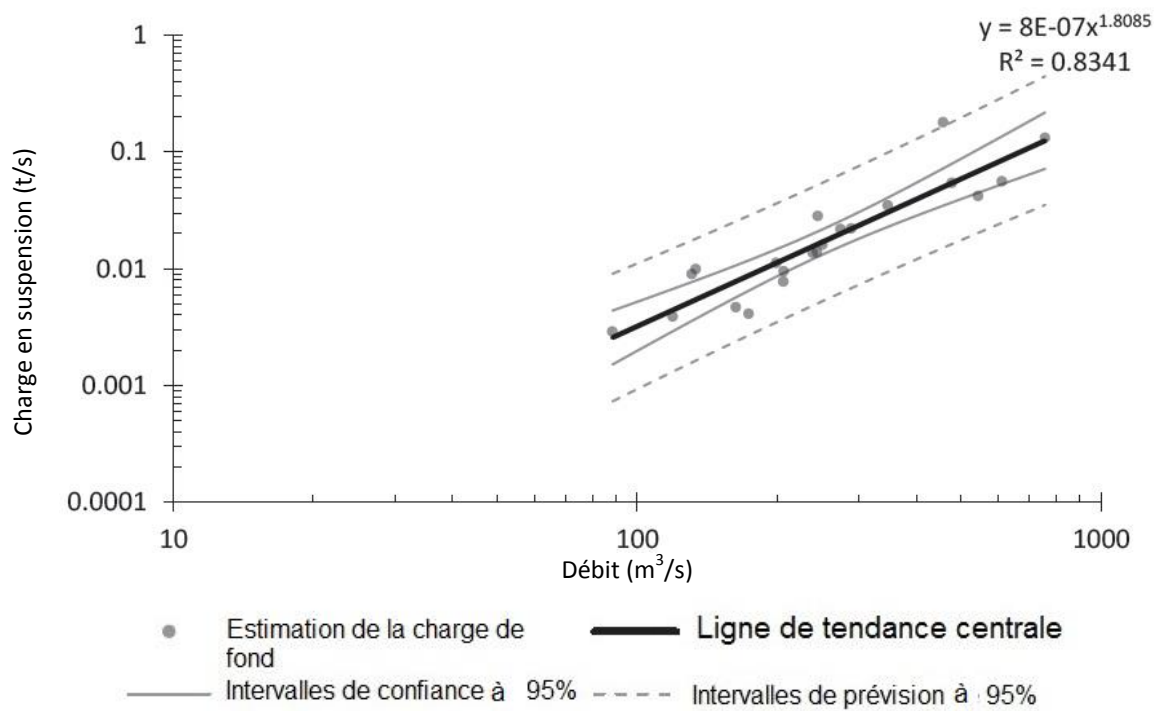


Figure 10.15. Courbe de tarage des sédiments du fond pour la station de mesurage des sédiments Sarapiquí (BSa)

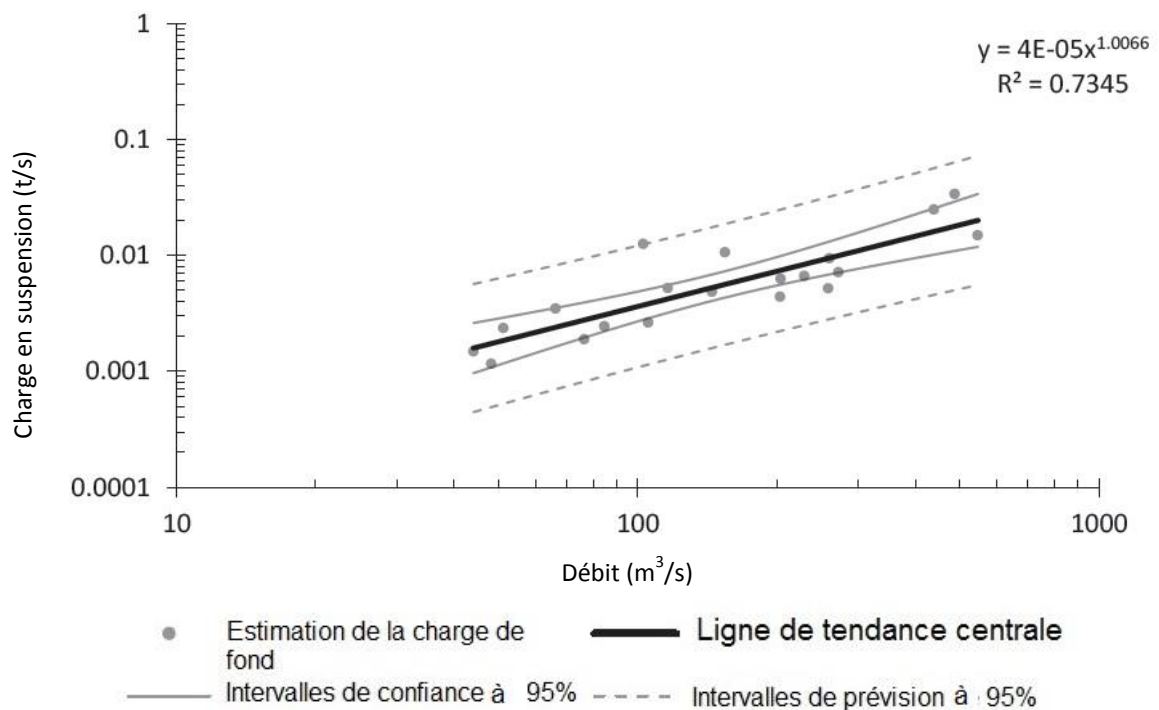


Figure 10.16. Courbe de tarage des sédiments du fond pour la station de mesurage des sédiments San Carlos (BSC)

ANNEXE 6

BERNALD PACHECO CHAVES, «ANALYSE DU RAPPORT «RÉPERCUSSIONS ÉCOLOGIQUES DE LA ROUTE 1856 SUR LE FLEUVE SAN JUAN, NICARAGUA» DE JUILLET 2014 (RÍOS TOUMA 2014) ET RÉPONSE», OCTOBRE 2014

Rapport technique remis au centre scientifique tropical

La présente analyse est formulée en réponse aux critiques exprimées par Mme Ríos Touma dans son rapport intitulé «Répercussions écologiques de la route 1856 sur le fleuve San Juan, Nicaragua» de juillet 2014 (annexe 4 à la réplique du Nicaragua) vis-à-vis de l'étude des macroinvertébrés figurant dans le volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement de la route 1856 (2013). Une analyse critique de l'étude de Mme Ríos Touma est également proposée.

M. Bernald Pacheco Chaves, de nationalité costa-ricienne, est biologiste et travaille depuis dix ans dans le domaine de la biologie des eaux douces au Costa Rica. Il est chercheur associé en entomologie aquatique au musée de zoologie de l'Université du Costa Rica. Il est également directeur du laboratoire de suivi biologique aquatique AquaBioLab S.A. Il a publié plus d'une centaine de rapports techniques d'évaluation de l'impact sur l'environnement, la plupart concernant le volet aquatique. Son curriculum vitae est joint au présent rapport en tant qu'appendice A.

1. Réponse aux critiques formulées par Mme Ríos Touma dans son rapport intitulé «Répercussions écologiques de la route 1856 sur le fleuve San Juan, Nicaragua» de juillet 2014 (annexe 4 à la réplique du Nicaragua) vis-à-vis de l'étude des macroinvertébrés figurant dans le volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement (rapport du CCT, 2013).

Dans son rapport de 2014, Mme Ríos Touma affirme que le volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement réalisé en 2013 ne contient pas d'état des lieux des cours d'eau dans lesquels les macroinvertébrés ont été prélevés et qu'il n'apparaît pas clairement que les sites d'échantillonnage se trouvant en amont (sites ne subissant pas d'influence directe ou sites cibles) remplissent cette fonction. Les résultats observés sur les sites se trouvant en aval (subissant l'influence directe des routes) ont été comparés aux résultats obtenus sur les sites se trouvant en amont. La méthode d'échantillonnage est clairement expliquée dans le volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement et, à ce titre, la source n'a pas été citée. Ramirez (2010) confirme notamment l'intérêt scientifique de pareille méthodologie. Selon le rapport de Mme Ríos Touma de 2014, le volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement présente une lacune en ce qu'il n'inclut pas une analyse de granulométrie. Or, pareille analyse ne relevait pas du champ d'application et des objectifs du diagnostic et ne figure pas dans l'évaluation écologique de suivi. Dans les deux cas, les substrats ont été caractérisés à l'aide d'une méthode qualitative permettant de les classer dans les catégories suivantes : bloc, éboulis, gravier, sable, vase et argile.

Mme Ríos Touma critique l'absence de méthodologies statistiques dans l'analyse des macroinvertébrés. De fait, l'analyse se fondait sur les résultats de l'indice BMWP adapté au Costa Rica, qui attribue des scores de sensibilité aux macroinvertébrés présents dans le cours d'eau, faisant fonction de bioindicateurs. Les taxons les plus sensibles se voient attribuer un score élevé et les plus tolérants un score faible. Les scores attribués aux taxons présents sont ensuite additionnés et leur total comparé à un ensemble de catégories, afin d'évaluer son classement. Ainsi, chaque site étudié se voit attribuer une note correspondant à la qualité de son eau, allant d'excellente à médiocre.

Mme Ríos Touma fait état d'une affirmation figurant dans le diagnostic de l'impact sur l'environnement de 2013 selon laquelle, en un an et demi, la communauté des macroinvertébrés s'est reconstituée. Or, il s'agit d'une mauvaise interprétation du document dans son contexte. En effet, les auteurs indiquent qu'il est possible que certains résultats de l'analyse des macroinvertébrés aient été affectés par le début des travaux, dix-huit mois avant la réalisation du diagnostic de l'impact sur l'environnement. Pendant cette période, les communautés de macroinvertébrés ont pu se reconstituer dans le cadre d'un processus naturel de résilience.

Plus loin, Mme Ríos Touma exprime un avis critique quant aux cartes figurant dans le diagnostic de l'impact sur l'environnement de 2013 et fait valoir qu'elles ne sont pas accompagnées de légendes explicatives. Or, après réexamen des cartes des sites d'échantillonnage figurant dans le diagnostic, nous n'avons pas été en mesure de déterminer où se situent ces prétendues omissions. Au contraire, toutes les cartes disposent de légendes explicatives particulièrement claires, conformes aux usages cartographiques.

2. Analyse du rapport «Répercussions écologiques de la route 1856 sur le fleuve San Juan, Nicaragua» de juillet 2014.

Le modèle expérimental retenu par Mme Ríos Touma dans son rapport de 2014, ainsi que ses conclusions, comporte certaines lacunes. *Premièrement*, selon le rapport de Mme Ríos Touma, les travaux de construction de la route 1856 ont une incidence sur les deltas de la rive sud du fleuve San Juan, mais non sur ceux de la rive nord. Il découle de cet argument que, le cas échéant, l'impact de la route sur le fleuve se limiterait à la rive du fleuve adjacente au Costa Rica. Cette affirmation est en nette contradiction avec la notion de «continuum fluvial» (Vannote et al. 1980), qui conceptualise le fleuve comme un continuum dans lequel la composition des communautés aquatiques évolue depuis le bassin supérieur, jusqu'au bassin intermédiaire et au bassin inférieur, en fonction des conditions environnementales. Dans le cas d'un continuum, on s'attendrait ainsi à ce qu'un débit élevé de sédiments modifie les conditions en aval, non pas uniquement et de façon sélective sur une seule rive, mais bien dans l'ensemble de l'environnement aquatique, sur les deux rives et plus particulièrement sur les sites qui, en raison de leurs caractéristiques hydrologiques, sont susceptibles d'emprisonner les sédiments et de former des deltas. Au demeurant, accepter l'argument de Mme Ríos Touma selon lequel les deltas de la rive nord du fleuve ne sont pas affectés par les sédiments provenant des travaux de la route 1856 reviendrait à disposer d'une preuve de l'absence d'impact significatif sur le fleuve San Juan, les sites d'échantillonnage de la rive nord ne présentant aucun impact d'après ce rapport. En résumé, l'argument selon lequel la rive nord n'a pas été affectée par les travaux de la route 1856 contredit l'affirmation de Mme Ríos Touma selon laquelle les travaux de la route ont conduit à une dégradation significative des communautés aquatiques du fleuve San Juan.

Deuxièmement, la conception du modèle expérimental employé par Mme Ríos Touma comprend une autre erreur ou omission, à savoir l'absence de prise en compte des variables d'utilisation des sols. Selon Roldán et Ramirez (2008), plusieurs facteurs régissent les processus physiques et morphologiques des fleuves, parmi lesquels le climat local, la nature de la végétation sur les rives, l'utilisation des sols dans leur zone d'influence et les interventions humaines directes. Dans son rapport, Mme Ríos Touma applique un critère non paramétrique faible de pertinence statistique afin de comparer les variables de la rive nord, située en territoire nicaraguayen et dotée d'une couverture forestière dense, tout du moins sur les rives du fleuve San Juan (réserve Indio Maiz), à celles de la rive sud du fleuve en territoire costa-ricien qui, comme en attestent les visites sur site effectuées en 2013 (par voie terrestre et aérienne) et en 2014 (par voie terrestre), accueille des activités d'exploitation agricole et d'élevage sur la majeure partie de l'extension de la route 1856. Ce même rapport souligne les écarts de température de l'eau entre les affluents nicaraguayens et les affluents costa-riciens du fleuve San Juan, ces derniers présentant des températures plus élevées. Selon Mme Ríos Touma, cet écart s'expliquerait par la faible couverture forestière du territoire costa-ricien. L'utilisation des sols est une variable importante,

pourtant absente de l'analyse effectuée par Mme Ríos Touma dans son rapport de 2014, ce qui remet en cause la validité de son argument selon lequel les travaux de la route 1856 ont conduit à une dégradation significative des communautés aquatiques du fleuve San Juan.

Le rapport de Mme Ríos Touma présente en outre un biais considérable pour ce qui est de l'échantillonnage : en effet, 14 des 16 sites d'échantillonnage sont concentrés dans la portion du fleuve San Juan située entre Infiernito et Boca San Carlos qualifiée de «stratégique» dans le diagnostic de l'impact sur l'environnement de 2013, tandis que la majeure partie du reste de la zone concernée par le projet (entre Boca San Carlos et Delta Costa Rica) n'a fait l'objet d'aucun prélèvement. Les sites d'échantillonnage n'ont pas été choisis au hasard et force est de constater qu'ils se concentrent sur le tronçon de la route qui se trouve dans le plus mauvais état. Seuls 2 des 16 sites ne se situent pas dans ce tronçon stratégique. Ce choix témoigne de l'absence de critères objectifs quant à la définition des sites d'échantillonnage.

Dans son rapport, Mme Ríos Touma impute l'accumulation de sédiments dans les deltas de la marge sud du fleuve San Juan aux travaux de la route 1856. Or, aucun état des lieux préalable ne permet de procéder à une comparaison scientifique objective. Pour démontrer scientifiquement que l'environnement a bien connu des modifications imputables à la construction de la route 1856, il faudrait disposer de données concernant l'état de la zone avant la construction. En l'absence de pareil état des lieux, il est discutable d'imputer les dommages prétendument causés aux travaux de la route 1856.

Le rapport de Mme Ríos Touma présente une autre lacune, à savoir la méthode d'échantillonnage utilisée, qui consiste en un prélèvement D Net de 2 minutes par site. Or, cette durée n'est pas considérée comme suffisante pour obtenir un échantillon représentatif de macroinvertébrés benthiques sur un site d'échantillonnage. Reyes-Morales et Springer (2014) ont évalué cette méthode à l'aide de plusieurs sous-échantillons de 5 minutes et recommandé de procéder à des prélèvements d'une durée de 10 minutes.

Dans son rapport, Mme Ríos Touma précise que nombre des taxons présents sont sensibles aux sédiments ; or, l'auteur fonde son argument sur des articles scientifiques portant sur des études réalisées aux États-Unis (Zweig & Rabeni 2001, Carlisle et al. 2007). Cette approche présente deux lacunes majeures : *premièrement*, les études que l'auteur cite à titre de référence ne correspondent pas à la zone étudiée, aux pays ou même aux tropiques concernés. Les conditions environnementales propres aux zones tempérées diffèrent profondément de celles des zones tropicales et il semblerait que les macroinvertébrés puissent avoir des réactions différentes à certains stimuli environnementaux dans des régions distinctes (Heino, 2014). *Deuxièmement*, le niveau de résolution taxonomique auquel renvoie le rapport remonte jusqu'à la famille et au genre, ce qui est habituel dans les études de ce type. Or, chez les macroinvertébrés, l'identification taxonomique au niveau de l'espèce est rarement possible à l'aide de la littérature scientifique existante et nécessite un haut niveau d'expertise taxonomique. Pour cette raison, il est très difficile de savoir si les espèces étudiées dans les articles cités par Mme Ríos Touma correspondent ou non aux espèces présentes dans le fleuve San Juan. Si nous n'excluons pas la possibilité que certaines espèces soient communes (les espèces cosmopolites, notamment), il est fort probable qu'elles diffèrent de celles présentes dans le fleuve San Juan. Il faut en outre tenir compte de la variabilité de la tolérance des macroinvertébrés aux sédiments en fonction de la résolution taxonomique employée (Bailey et al. 2001), voire entre différentes espèces du même genre (Flowers 2009).

Sur ce point précis de l'étude menée par Mme Ríos Touma, nous avons repéré une contradiction très importante. D'une part, l'auteur avance que les communautés aquatiques du fleuve San Juan se sont dégradées de façon significative en raison du dépôt de sédiments provenant des travaux de construction de la route 1856 et d'autre part, elle fournit une liste de taxons qu'elle a collectés dans le fleuve San Juan et qui sont sensibles aux sédiments présents dans l'environnement aquatique. Si l'on considère que la tolérance de ces taxons est effectivement applicable au site étudié, Mme Ríos Touma fournit ainsi une preuve de la présence de ces «macroinvertébrés

sensibles aux sédiments» dans un soi-disant «écosystème aquatique dégradé». On pourrait donc en conclure que les communautés aquatiques n'ont pas subi de dégradation, puisque des «macroinvertébrés sensibles aux sédiments» sont présents sur les sites d'échantillonnage du fleuve San Juan.

Selon Roldán et Ramírez (2008) :

«la nature physicochimique des eaux d'un bassin hydrographique et leur productivité biologique dépendent de la nature de son sol, de son utilisation et de son état de conservation ... Les substrats alluvionnaires sablonneux et argileux se situent dans les segments inférieurs des fleuves de faible courant. Ces types de substrat présentent une faune benthique très pauvre, leur environnement étant trop instable pour qu'elle puisse s'y installer. La faune qui y prédomine est constituée d'organismes supportant un potentiel d'oxygène faible, tels les oligochètes, les mollusques et les chironomidés (*Diptera Chironomidae*). A mesure que le fleuve approche de la vallée, le débit de l'eau diminue ... D'un point de vue écologique, la présence de quantités importantes de matières solides dissoutes dans un cours d'eau atteste d'une conductivité élevée, susceptible de restreindre la survie de nombreuses espèces, soumises à la pression osmotique. Une forte concentration de matières solides en suspension ou une turbidité importante constituent également une gêne pour l'écosystème aquatique, en ce qu'ils empêchent le passage de la lumière naturelle, endommagent et obstruent les organes d'échanges gazeux chez les animaux aquatiques (ouïes, intestins) et détruisent leurs habitats naturels.»

Lorsqu'on emploie les macroinvertébrés comme bioindicateurs de la qualité de l'eau, il est très courant de se servir des chironomidés (*Diptera Chironomidae*) comme bioindicateur tolérant aux évolutions de l'environnement (voir par exemple Sandoval et Molina Astudillo 2000), ceux-ci étant capables de se développer dans des environnements bien plus variés que toute autre famille d'insectes aquatiques (Ferrington et al. 2008). À une échelle plus locale, l'indice BMWP adapté au Costa Rica attribue à cette famille en particulier un score de 2 sur une échelle allant de 1 à 9, le chiffre 1 indiquant la tolérance la plus élevée et le chiffre 9 la tolérance la plus faible (MINAE-S, 2007). Une analyse du nombre d'individus que Mme Ríos Touma présente à l'annexe 4 de son rapport et une estimation du pourcentage d'individus relevant des chironomidés (*Diptera Chironomidae*) révèlent que 68 % des individus collectés appartiennent à cette famille (829 sur 1219). Il existe donc une prédominance nette d'un taxon généralement considéré comme bioindicateur de la tolérance aux impacts dans l'environnement aquatique. Salvatiera et al. (2013) sont parvenus à des conclusions équivalentes dans une étude menée dans le fleuve San Juan : les auteurs ont prélevé des macroinvertébrés en tant que bioindicateurs sur 10 sites d'échantillonnage le long du fleuve, à l'aide de la méthode des substrats artificiels. Ils en ont conclu à la présence de chironomidés sur la totalité des sites et à leur prédominance en abondance relative dans 90 % des sites en saison sèche et 80 % en saison des pluies. De surcroît, les prélèvements effectués à l'aide d'une drague sur 20 sites d'échantillonnage répartis le long du fleuve San Juan ont révélé une prédominance des chironomidés dans 80 % des sites en saison sèche et 65 % en saison des pluies, les pourcentages variant de 40 à 100 % des individus par site pour les sites abritant cette famille en toute saison.

Conclusion

J'estime que l'étude de Mme Ríos Touma (2014) ne fournit pas de preuve valable de ce que les communautés aquatiques du fleuve San Juan auraient subi une dégradation sensible due à l'apport de sédiments produits par la construction de la route 1856.

ANNEXE 7

ARTURO ANGULO SIBAJA, «DIAGNOSTIC DE L'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT, ICTHYOFAUNE DU FLEUVE SAN JUAN», ANALYSE DOCUMENTAIRE, NOVEMBRE 2014

Evaluation écologique de suivi du volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement de la route 1856

Biographie de l'auteur

Ancien étudiant de l'Université du Costa Rica, M. Arturo Angulo a ensuite participé à plusieurs projets de recherche auprès du centre de recherche marine et du musée de zoologie de l'université. Ses recherches ont donné lieu à la publication de plusieurs articles relatifs à l'ichtyofaune du Costa Rica dans différentes revues internationales. En 2014, M. Arturo Angulo s'est vu octroyer une bourse doctorale de l'Organisation des États américains (OEA) afin d'étudier la biologie animale à l'Université Estadual Paulista du Brésil, à compter de l'année 2015. Ses travaux de recherche portent sur la systématique, la taxonomie, la biogéographie et l'écologie des poissons d'eau douce (notamment néotropiques) et d'eau de mer (notamment d'eau profonde).

Introduction

Afin d'établir des critères techniques utiles à l'analyse des effets potentiels de la construction de la route 1856 sur le fleuve San Juan, et particulièrement sur les poissons qu'il abrite, et compte tenu de l'impossibilité d'effectuer des prélèvements en raison du refus du Nicaragua d'autoriser le Costa Rica à conduire des études dans le fleuve, une analyse documentaire a été réalisée pour recenser les espèces de poissons relevées dans des études antérieures concernant le fleuve San Juan. Cette analyse entend fournir des informations quant à la présence, à l'abondance et à la tolérance des poissons dans des environnements présentant des apports sédimentaires élevés, à l'échelle des espèces, des genres et des familles dans certains cas.

En outre, des informations concernant les espèces de poissons présentes dans les affluents du fleuve San Juan ont été obtenues, ces affluents étant à la fois pourvoyeurs de sédiments et d'ichtyofaune pour le fleuve.

Résultats de l'analyse

Après avoir mené un programme de suivi d'une durée d'environ un an (février 2004-avril 2005) dans le bassin hydrographique du fleuve Térraba sur le littoral pacifique du Costa Rica, dans des environnements perturbés et intacts, Rojas et Rodriguez (2008) ont conclu à l'absence de corrélation nette entre la richesse et l'abondance des espèces de poissons dans le bassin et certaines variables physicochimiques, telles que les matières solides en suspension, les matières solides dissoutes et la turbidité. Ces variables ont été mesurées dans 4 stations situées le long du bassin et comparées à la charge sédimentaire totale dans le bassin hydrographique. Pendant la période et dans la zone concernées, les auteurs ont recensé au total 33 espèces et 14 familles de poissons, les familles plus diverses étant les cichlidés ($n = 5$), les characidés ($n = 4$) et les poeciliidés ($n = 3$). Les individus de ces familles étaient également les plus fréquemment collectés (plus de 75 % de l'ensemble des spécimens capturés). Les auteurs ont démontré que des variables environnementales, comme la température, l'oxygène dissous, la saisonnalité (hiver/été) et la proximité de la mer, sont des facteurs plus importants de la structure et de la composition des communautés de poissons dans ce bassin.

Rojas et Rodriguez (2008), tout comme Cotta-Ribeiro et Molina-Ureña (2009), signalent la présence d'*Agonostomus monticola* (mugilidés) «tepemechín» dans le bassin, espèce que l'on retrouve dans le macrobassin du fleuve San Juan (Bussing 1998). Outre le «tepemechín» (*Agonostomus monticola*), Rojas et Rodriguez (2008) recensent la présence d'espèces telles que *Poecilia gillii*, *P. mexicana* (poeciliidés) et *Astyanax aeneus*, que l'on retrouve également dans le macrobassin du fleuve San Juan (Bussing 1998). Rojas et Rodriguez (2008) notent en outre la présence d'espèces telles que *Archocentrus sajica*, *Astatheros altifrons*, *Theraps sieboldii* (cichlidés) et *Priapichthys panamensis* (poeciliidés), qui ont des «équivalents écologiques» (Bussing 1998) dans le macrobassin du fleuve San Juan, à savoir *Archocentrus septemfasciatus*, *Astatheros alfari*, *Theraps underwoodii* et *Priapichthys annectens*, respectivement.

Bien que Rojas et Rodriguez (2008) n'aient pas approfondi la question de l'effet de l'évolution des variables environnementales mesurées (matières solides en suspension, matières solides dissoutes et turbidité, entre autres) à l'échelon intraspécifique, pour ce qui est des différences observées dans les valeurs d'abondance relative, on peut déduire des résultats dans leur ensemble que les écarts de valeurs de ces paramètres n'ont pas d'effet significatif sur la diversité et l'abondance des taxons concernés, en particulier chez les cichlidés, les characidés, les poeciliidés et les mugilidés.

Ce raisonnement peut aussi s'appliquer au macrobassin du fleuve San Juan, au titre de l'hypothèse de l'équivalence écologique (Bussing 1998) et compte tenu des paramètres qui rendent ces deux bassins comparables : origine géologique, utilisation des sols, régime climatique, biozones, proximité géographique relative et limites verticales. Sur ce dernier aspect, il convient de noter que les prélèvements dans le bassin du fleuve Térraba ont été effectués entre 15 et 145 mètres d'altitude (Rojas et Rodriguez 2008), ce qui correspond en partie à la position du macrobassin du fleuve San Juan (entre 1 et 31 mètres d'altitude).

Bonatti et al. (2005) ont établi que l'apport sédimentaire total du bassin du fleuve Térraba s'élevait à 404 tonnes/km²/an, principalement en raison de l'association d'un certain type d'utilisation des sols et de l'érosion due aux précipitations. D'après les données présentées par Rojas et Rodriguez (2008), cet apport sédimentaire pourtant élevé ne semble pas avoir d'effet mesurable sur la dynamique et la structure des populations de poissons dans la région.

De même, Villegas (2011) conclut à l'absence d'écarts significatifs sur le plan statistique dans l'abondance des espèces de poissons dans les cours d'eau de la région pacifique méridionale du Costa Rica entre les zones subissant une influence humaine et les zones intactes, ou en matière de capture des espèces. Les variables physicochimiques de l'eau les plus importantes dans son modèle de corrélation canonique étaient la vitesse du débit et le type de substrat, tandis que des variables telles que la température, le pH, l'oxygène dissous, le pourcentage de saturation de l'oxygène, la salinité, le potentiel d'oxydoréduction, la conductivité, la concentration ionique, la quantité totale de matières solides dissoutes et la turbidité (dont la plupart sont liées à l'apport sédimentaire total dans le bassin) n'avaient aucun effet sur la structure des communautés de poissons. Villegas (2011) avance que les influences anthropiques (pollution et sédimentation) dans les fleuves étudiés n'ont pas eu d'incidence sur la qualité de l'eau ou la formation de bancs de poissons d'eau douce dans la zone. Il conclut également que les fluctuations observées des variables environnementales, de l'abondance, de la richesse, de la répartition et de la diversité des poissons sont normales et caractéristiques de ces écosystèmes dynamiques.

Dans son étude, Villegas (2011) recense au total 24 espèces et 12 familles de poissons. De nouveau, les poeciliidés (n = 5), les cichlidés (n = 4) et les characidés (n = 4) sont les familles qui présentent les valeurs d'abondance relative et de diversité les plus élevées. Il convient de noter que l'espèce *Agonostomus monticola* (mugilidés) a été collectée à une fréquence relativement élevée, puisqu'elle est la septième espèce la plus capturée de l'étude (3,37 % des captures totales).

Dans la lignée des résultats obtenus par Rojas et Rodriguez (2008) pour les poissons du bassin du fleuve Térraba, Villegas (2011) fait valoir que les variations de la diversité des poissons et de leurs assemblages taxonomiques sont une conséquence des ruptures géomorphologiques et de la complexité structurelle des écosystèmes. Rien ne permet d'établir un lien entre pareilles valeurs et les conditions physicochimiques de l'eau, encore moins si elles sont imputables à l'activité humaine. Ces résultats indiquent un certain degré de tolérance des communautés de poissons à l'évolution de ces paramètres (température, pH, oxygène dissous, pourcentage de saturation de l'oxygène, salinité, potentiel de réduction de l'oxygène, conductivité, concentration ionique, quantité totale de matières solides dissoutes et turbidité).

Pour le bassin de la rivière Frio, située dans la partie caraïbe septentrionale du Costa Rica, Ortin et al. (2009) ont établi l'apport sédimentaire à 897 tonnes/km²/an, principalement en raison de l'association des types d'utilisation des sols et de l'érosion due aux précipitations, comme pour le fleuve Térraba. En comparaison avec l'apport sédimentaire mesuré dans d'autres bassins du pays, dont celui du Térraba, cette valeur peut sembler élevée, puisqu'elle est 2,22 fois supérieure à la valeur enregistrée pour ce bassin par Bonatti et al. (2005). Pour autant, le bassin présente de façon générale une ichtyofaune riche composée de 52 espèces au total (Angulo et al. 2013), et dans laquelle les cichlidés (n = 15), les poeciliidés (n = 9) et les characidés (n = 8) prédominent à la fois en nombre d'espèces et en abondance relative (Garita et Angulo 2009, Saenz et al. 2009). Le bassin du fleuve Térraba présente quant à lui une ichtyofaune composée de 88 espèces au total (Angulo et al. 2013). Or, contrairement à la rivière Frio, le Térraba est un fleuve côtier dans lequel la composante halieutique périphérique (sensu Bussing 1998) a une influence plus importante (Angulo et al. 2013). Cette différence pourrait expliquer les écarts entre les valeurs absolues de diversité taxonomique des deux bassins. Pour ce qui est de la prédominance des cichlidés dans le bassin de la rivière Frio, Saenz et al. (2009) soulignent que la tolérance aux variations environnementales et la plasticité génétique, caractéristiques de cette famille, ont une incidence sur sa forte représentation dans le bassin. En effet, pareils attributs constituent un avantage sur les autres taxons de l'ichtyofaune locale. L'apport sédimentaire total enregistré pour ce bassin permet de conclure à une tolérance ou une adaptation des poissons locaux à de telles conditions.

Saenz et al. (2009) ont également fait état d'une évolution de la composition des espèces de poissons dans le bassin de la rivière Frio, corrélée à l'évolution des niveaux de précipitations. Lors de la saison des pluies (de mai à septembre), les auteurs ont recensé une plus grande diversité d'espèces (20 contre 17 aux mois de mars et d'avril, moins pluvieux). D'autres auteurs, tels que Black (1996), Restrepo (2005) et Arroyave-Rincón et al. (2012), ont démontré une corrélation positive entre le niveau de précipitations et l'apport sédimentaire total dans les bassins hydrographiques tropicaux. Compte tenu des résultats présentés dans Saenz et al. (2009) et du schéma de covariation qui en ressort, ainsi que cela a été démontré pour les bassins de la région pacifique méridionale du Costa Rica, il est possible de déduire qu'une évolution de l'apport sédimentaire liée à l'augmentation des précipitations n'aura pas d'effet négatif sur la composition de l'ichtyofaune locale, pour ce qui est du nombre total de taxons recensés. Cette conclusion indiquerait, conformément aux résultats présentés ci-dessus, un certain degré de tolérance ou d'adaptation des communautés de poissons de la région à l'évolution des quantités de matières solides en suspension, des quantités de matières solides dissoutes et de la turbidité associées à un apport sédimentaire plus élevé.

Pour le bassin du fleuve Aranjuez, situé dans la région pacifique centrale du Costa Rica, Tiffer-Sotomayor (2005) fait état d'augmentations spectaculaires des concentrations moyennes de matières solides totales, de matières solides dissoutes et de matières solides en suspension en cas d'inondations. Les augmentations en question étaient 51 fois supérieures aux niveaux de base (6000 mg/l contre 117,4 mg/l). Dans le bassin du fleuve Aranjuez, au moins 10 espèces de poissons ont été recensées (Bussing 1998, Tiffer-Sotomayor 2005), parmi lesquelles *Agonostomus monticola* (mugilidés), *Astyanax aeneus* (characidés), *Archocentrus nigrofasciatus* (cichlidés) et *Poecilia gillii* (poeciliidés), que l'on retrouve également dans le macrobassin du fleuve San Juan (Bussing 1998, Angulo et al. 2013). Après les inondations, Tiffer-Sotomayor (2005) n'a pas

recensé de diminution spectaculaire des abondances relatives de ces espèces. Cette conclusion pourrait indiquer une certaine tolérance des espèces étudiées à l'évolution des concentrations moyennes de matières solides totales, de matières solides dissoutes et de matières solides en suspension associée à l'augmentation de l'apport sédimentaire en cas d'évolutions saisonnières des niveaux d'eau. Des conditions et des effets similaires ont été observés dans d'autres bassins costariciens, à savoir ceux des rivières Reventazón, San Carlos et Sarapiquí (PROCUENCA-San Juan 2004, Jimenez et al. 2005), qui sont tous situés sur le versant caraïbe, les rivières San Carlos et Sarapiquí faisant partie du macrobassin du fleuve San Juan.

Historiquement, le macrobassin du fleuve San Juan a subi un processus de sédimentation naturelle, puisqu'il se déverse à deux endroits : la baie ou lagune de San Juan del Norte, où les sédiments s'accumulent, et l'embouchure du fleuve Colorado au Costa Rica, où le débit est plus élevé (PROCUENCA-San Juan 2004). En particulier, le fleuve Colorado, qui fait partie du bassin du fleuve Tortuguero, abrite l'une des ichtyofaunes d'eau douce les plus diversifiées d'Amérique centrale (Bussing 1998, Angulo et al. 2013) comptant près de 115 espèces recensées, c'est-à-dire 46 % du nombre total d'espèces connues au Costa Rica (Angulo et al. 2013). Dans ce bassin, les cichlidés ($n = 16$), les poeciliidés ($n = 9$) et les characidés ($n = 8$) prédominent (Angulo et al. 2013). Les bassins adjacents présentent un modèle similaire de diversité associée à une sédimentation élevée, certains d'entre eux faisant partie du macrobassin du fleuve San Juan et affichant un apport sédimentaire total supérieur à 600 tonnes/km²/an (PROCUENCA-San Juan 2004). À titre d'exemple, à la station de Terrón Colorado Station sur la rivière San Carlos, on recense un apport sédimentaire total de 817 tonnes/km²/an (PROCUENCA-San Juan 2004). Dans le bassin du San Carlos, Bussing (1998) et Angulo et al. (2013) ont recensé 54 espèces de poissons au total, parmi lesquelles les cichlidés ($n = 15$), les poeciliidés ($n = 10$) et les characidés ($n = 8$) prédominent.

À la station Peñas Blancas, située sur la rivière du même nom, toujours dans le bassin du fleuve San Carlos, on enregistre une charge sédimentaire totale de 700 tonnes/km²/an (PROCUENCA-San Juan 2004), tandis que Molina (2008) recense au total 31 espèces de poissons dans le sous-bassin (Peñas Blancas) où les cichlidés ($n = 10$), les characidés ($n = 5$) et les poeciliidés ($n = 4$) prédominent. Parallèlement, dans le bassin de la rivière Reventazón, qui se déverse dans la mer des Caraïbes, l'apport sédimentaire enregistré (à la station du barrage de Cachí) peut atteindre 1158,9 tonnes/km²/an (Jimenez et al. 2005). Dans ce bassin, comme précédemment, on observe une grande variété de poissons et la présence de 65 espèces en tout, les cichlidés ($n = 15$), les poeciliidés ($n = 6$) et les characidés ($n = 5$) présentant la plus grande diversité (Molina 2011). Il convient de souligner que la présence d'*Agonostomus monticola* (mugilidés) a également été recensée dans les bassins du fleuve Colorado et des rivières San Carlos et Reventazón (Bussing 1998, Molina 2011, Angulo et al. 2013). La présence de ces taxons dans des cours d'eau présentant des apports sédimentaires importants pourrait être le signe de niveaux de tolérance élevés, ainsi que plusieurs auteurs l'ont laissé entendre (Bussing 1998 Tiffer-Sotomayor, 2005, Rojas et Rodriguez 2008, Saenz et al. 2009) et que le confirme la présente analyse.

Enfin, il semblerait que certaines espèces de poissons piscivores et insectivores parviennent, dans une certaine mesure, à mieux chasser en présence de concentrations élevées de matières solides en suspension et d'une turbidité importante (Chesney 1993, Berry et Hill 2003). Cela s'expliquerait par un contraste plus grand entre la proie et l'eau, qui facilite l'identification de la proie par le prédateur, qui devient lui-même moins repérable par la proie (Chesney 1993, Berry et Hill 2003). Dans le macrobassin du fleuve San Juan, de très nombreuses espèces piscivores et insectivores ont été recensées (Bussing 1998), tel les «guapotes» (*Parachromis dovii* et *P. managuensis*, famille des cichlidés), le vairon-brochet ou *Belonesox belizanus* (poeciliidés), la sardine à bec *Bramocharax bransfordii* (characidés), les «barbudos» (*Rhamdia spp.*) et l'*Atractosteus tropicus*, dont la plupart présentent un intérêt économique (Bussing 1998) et sont relativement communs dans certaines parties du macrobassin. Plusieurs de ces espèces (*Parachromis spp.*, *Belonesox belizanus* et *Atractosteus tropicus*, par exemple) sont particulièrement abondantes dans les environnements lenticques présentant des niveaux élevés de matières solides en suspension et une turbidité importante (par exemple, les zones de Caño Negro

et Medio Queso dans le bassin de la rivière Frio) (Bussing 1998, Garita et Angulo 2009, Saenz et al. 2009). On peut donc en déduire l'existence d'un certain degré de tolérance, voire d'adaptation, de ces espèces à des quantités importantes de sédiments, comme le laissent entendre Chesney (1993) et Berry et Hill (2003).

ANNEXE 8

**PABLO E. GUTIÉRREZ FONSECA, *CRITICAL STATISTICAL ANALYSIS OF THE REPORT
«ECOLOGICAL IMPACTS OF THE ROUTE 1856 ON THE SAN JUAN RIVER, NICARAGUA»*
BY BLANCA RÍOS TOUMA, NOVEMBER 2014**

[Annexe non traduite]

ANNEXE 9

JUAN CARLOS FALLAS SOJO, «OBSERVATIONS SUR LE RAPPORT DE M. KONDOLF EN CE QU'IL A TRAIT AUX OURAGANS ET TEMPÊTES TROPICALES», 2014

Extrait de la section 1.2 Risques d'apports plus importants provenant de la route 1856 [annexe 1, pages 71-74], par Juan Carlos Fallas Sojo¹

A l'annexe 1 de la réplique du Nicaragua (le «rapport Kondolf»), M. Kondolf formule l'affirmation suivante (page 71) :

«[I]l est faux d'affirmer que le fleuve n'a jamais connu d'ouragans ou de tempêtes tropicales. En 1971, l'œil des ouragans Irene et Olivia est passé juste au nord du San Juan.»²

Cette affirmation est incorrecte. Premièrement, les ouragans Irene et Olivia ne constituaient pas deux phénomènes distincts. Il s'agit en fait des deux noms attribués au même phénomène survenu en 1971 : l'ouragan a été nommé Irene lors de son passage au-dessus de l'océan Atlantique, de la mer des Caraïbes et du territoire continental du Nicaragua. Lors de son passage au-dessus de l'océan Pacifique, il s'est vu attribuer le nom d'Olivia, en raison des différences de nomenclature des ouragans entre les bassins atlantique et pacifique.

L'ouragan Irene a pénétré sur le territoire nicaraguayen à Punta Gorda³ (voir carte ci-contre), à 68 km au nord-est de Delta Colorado, qui est le point de départ de la route 1856 le plus proche en territoire costa-ricien.

Lors de cet épisode, l'INETER a enregistré un volume de précipitations cumulées sur le bassin hydrographique du fleuve San Juan, en territoire nicaraguayen, de 100 millimètres⁴. Sur le plan hydrologique, le volume total de précipitations n'est pas un bon indicateur du modèle de ruissellement ou de l'hydrogramme de crue. Le modèle de ruissellement d'un bassin dépend de la répartition spatiotemporelle des précipitations. Dans le bassin du fleuve San Juan, ces caractéristiques revêtent une importance particulière en raison de l'effet modérateur du lac Nicaragua sur l'hydrogramme de crue. En supposant que le volume total de précipitations figurant dans les rapports de l'INETER s'est déversé sur deux à trois jours, ce qui est fréquent dans le cas d'un ouragan, un volume total de 100 millimètres ne correspond pas à un phénomène majeur



¹ Directeur général de l'institut costa-ricien de météorologie (Instituto Meteorológico Nacional) et professeur de physique et de météorologie à l'Université du Costa Rica.

² Rapport Kondolf, annexe 1, p. 71, par. 3.

³ Voir http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/meteorologia/Desastres/Huracanes/huracan_irene.htm, site consulté le 23 septembre 2014.

⁴ *Ibid.*

et risque de ne pas générer un hydrogramme de crue exceptionnel le long du chenal du fleuve San Juan. A titre d'exemple, le volume total de précipitations déversé sur le bassin de la rivière Sarapiquí sur une période de récurrence de cinq ans a été estimé à environ 200 millimètres en 48 heures. Par conséquent, un volume total de 100 millimètres de précipitations au-dessus du bassin hydrographique du fleuve San Juan en territoire nicaraguayen, ne constitue pas un phénomène majeur pour ce bassin.

En outre, à l'annexe 1 de la réplique du Nicaragua, M. Kondolf formule l'affirmation suivante (page 71, paragraphes 5 et 6) : «Parmi les exemples des fortes pluies qui peuvent s'abattre sur le fleuve San Juan et ses bassins versants figure la tempête tropicale ayant soufflé du 6 et 11 mai 2004...»⁵

M. Kondolf avance qu'une tempête tropicale a touché le Costa Rica en mai 2004. En cela, il commet une erreur. Le système météorologique à l'origine des précipitations sur le territoire du Costa Rica n'était pas une tempête tropicale, mais une perturbation bien plus faible, en termes d'intensité et de durée, que l'on appelle onde tropicale ou onde tropicale d'est. C'est d'ailleurs le terme qu'utilise la NASA, tel qu'il ressort clairement de l'image reproduite par M. Kondolf à la figure 32 de son rapport (page 72). Les phénomènes météorologiques de cette nature et de cette intensité sont de fait courants dans cette région, qui possède une dynamique lui permettant d'absorber l'intensité, la durée et la répartition de ce type de précipitations.

La caractérisation des effets des cyclones tropicaux au Costa Rica selon M. Kondolf

Un cyclone tropical est le terme générique désignant un type de circulation d'air associé à un centre de faible pression. Pareils phénomènes météorologiques sont qualifiés en fonction de leur intensité (de la plus faible à la plus élevée) de dépression, de tempête tropicale ou d'ouragan.

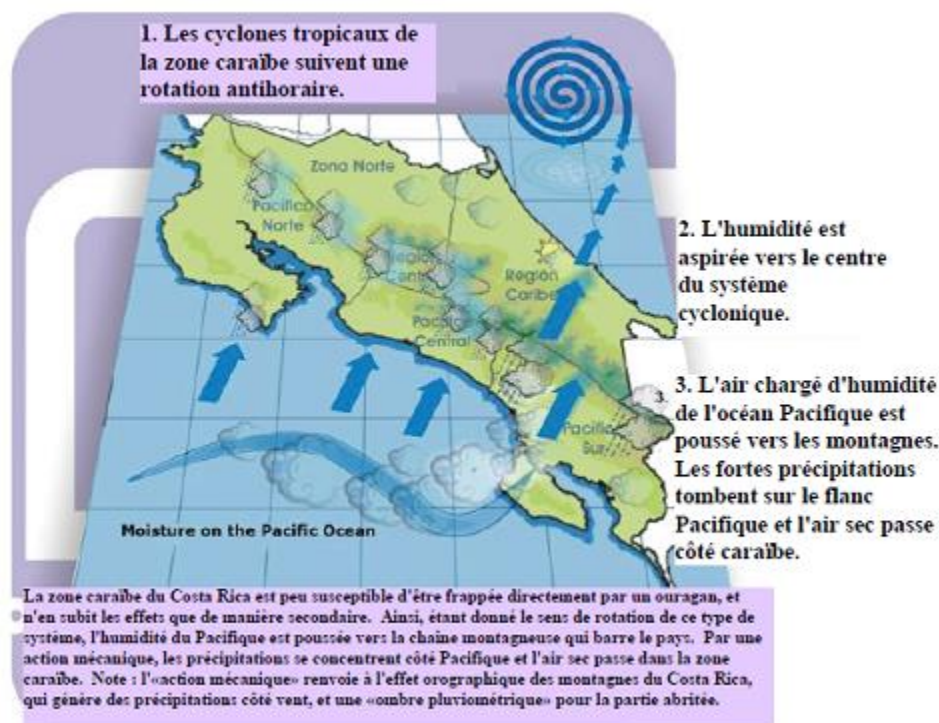


Figure 1 : Relation entre un cyclone tropical à proximité de la côte caraïbe du Nicaragua et la distribution des vents et des précipitations occasionnés au Costa Rica

⁵ Rapport Kondolf, annexe 1, p. 71, par. 5 et 6.

Bien qu'aucun ouragan ou tempête tropicale n'ait directement touché le Costa Rica au cours du XX^e siècle, ni au XXI^e siècle jusqu'à présent, certains cyclones tropicaux survenus dans d'autres pays ont eu des conséquences indirectes au Costa Rica. Pour autant, en raison du système montagneux élevé du Costa Rica, les précipitations associées à ce type de phénomènes sont plus importantes dans les bassins se déversant dans le Pacifique que dans ceux se déversant dans la mer des Caraïbes, comme c'est le cas du fleuve San Juan (figure 1 *supra*).

M. Kondolf ne fait aucune mention de la distribution caractéristique des précipitations dues aux cyclones tropicaux dans la mer des Caraïbes (figure 1), qui ressort clairement de la carte des précipitations enregistrées pendant l'ouragan Mitch (figure 2).

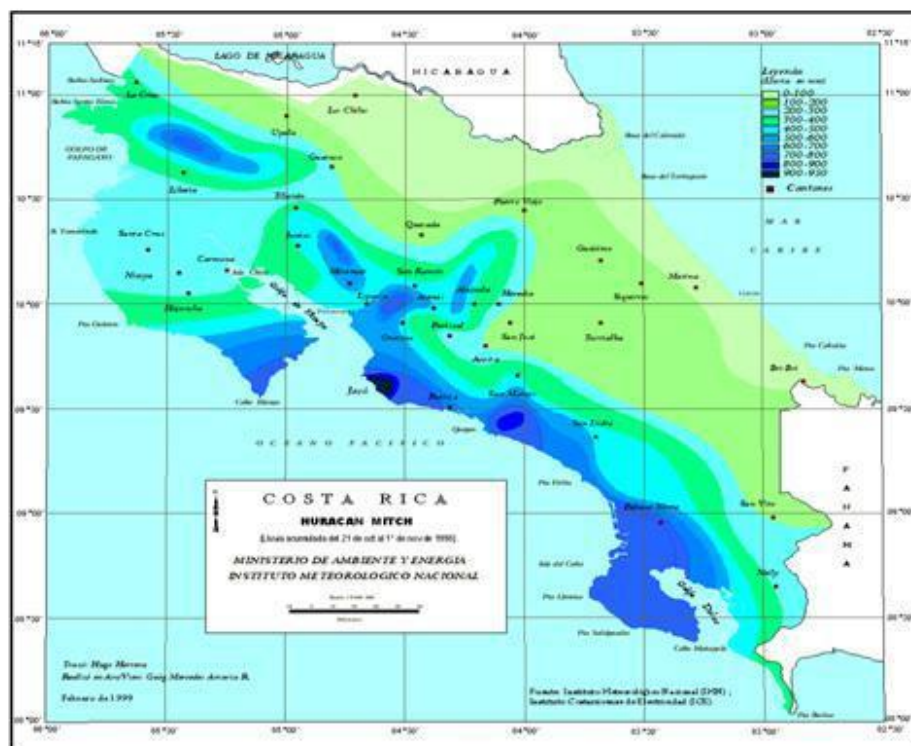


Figure 2 : Distribution des précipitations enregistrées au Costa Rica pendant l'ouragan Mitch

Il s'agit d'un point important, puisque M. Kondolf fait référence aux sept personnes tuées par l'ouragan Mitch au Costa Rica comme si ces décès étaient survenus dans le bassin du fleuve San Juan⁶. En cela, il commet une erreur. De fait, ces décès sont survenus dans le bassin hydrographique de l'océan Pacifique et non dans celui du fleuve San Juan ou de la mer des Caraïbes, de l'autre côté de la ligne continentale de partage des eaux, ce qui s'explique facilement par la circulation de l'air (figure 1) et la distribution des précipitations (figure 2).

Le nombre de personnes évacuées vers des abris des deux côtés de la ligne continentale de partage des eaux (versants pacifique et caraïbe, respectivement) témoigne clairement de la gravité de l'ouragan Mitch à l'échelle régionale et de son incidence plus importante sur le versant pacifique que sur le versant caraïbe (figure 2)⁷. Selon des rapports datant de la même période, 5 411 personnes ont dû quitter leur domicile. De ce nombre, seules 60 personnes vivaient dans le bassin hydrographique de la mer des Caraïbes, dans le district d'Upala de la province d'Alajuela (signalé en rouge à la figure 3 ci-dessous). Dans son rapport, M. Kondolf avance que «plusieurs

⁶ Rapport Kondolf, annexe 1, p. 72, par. 1.

⁷ Rapport CEPAL n° LC7MEX7L373 en date du 4 mars 1999 disponible à l'adresse suivante : www.cepal.org/publicaciones. Site consulté les 22 et 23 septembre 2014.

milliers [de personnes ont dû] quitter leurs maisons»⁸, ce qui est vrai. Or, il ne précise pas que la majeure partie des personnes déplacées vivait sur le versant pacifique, et non sur le versant caraïbe, des montagnes costa-riciennes.

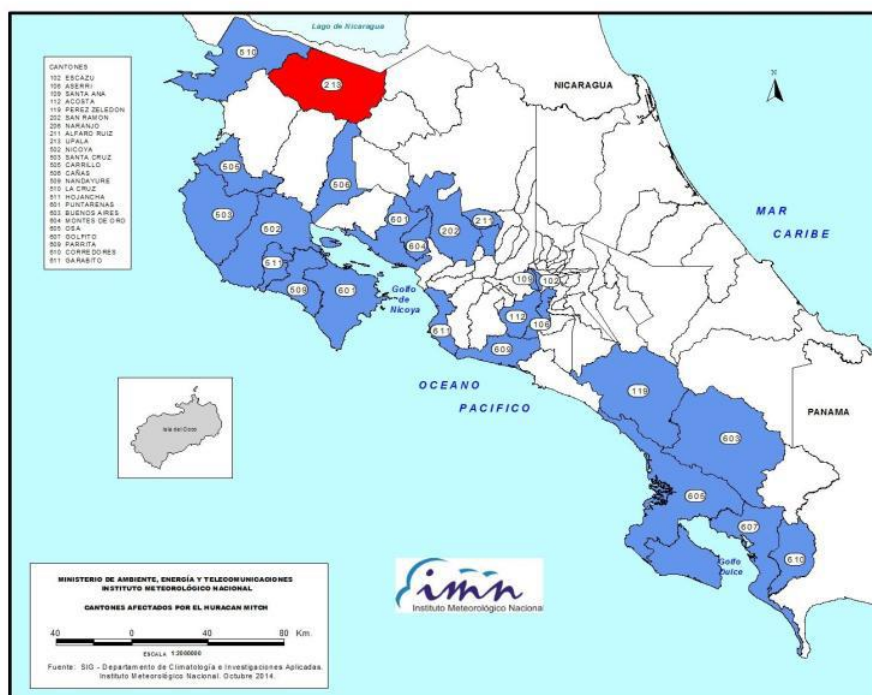


Figure 3 : Carte des cantons dont les habitants ont été déplacés en raison de l'ouragan Mitch. Les zones en bleu se situent dans le bassin pacifique. La zone en rouge correspond au seul canton situé dans le bassin caraïbe dont une partie de la population a été déplacée. Carte originale établie d'après des données obtenues auprès de la CEPAL (Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes). Voir note de bas de page 6.

⁸ Rapport Kondolf, annexe 1, p. 72, par. 1.

ANNEXE 10

ALLAN ASTORGA GÄTTGENS, «APPORTS SÉDIMENTAIRES EXTRAORDINAIRES CAUSÉS PAR DES PHÉNOMÈNES EXCEPTIONNELS DANS LE FLEUVE SAN JUAN», DÉCEMBRE 2014

Allan Astorga Gättgens : Titulaire d'une licence en géologie délivrée par l'Université du Costa Rica et d'un doctorat en sciences naturelles de l'Université de Stuttgart (Allemagne), spécialiste de la sédimentologie, de la géologie environnementale, de l'aménagement du territoire et de l'évaluation de l'impact sur l'environnement, professeur à l'Ecole centre-américaine de géologie de l'Université du Costa Rica depuis 1991. Décembre 2014

1. Introduction

Afin de mieux cerner la charge sédimentaire qui pénètre dans le fleuve San Juan, en particulier dans le secteur du bassin situé en territoire costa-ricien, la présente étude se propose d'analyser les apports sédimentaires extraordinaires causés par des phénomènes géologiques exceptionnels.

Cette question revêt une importance majeure, car le bassin du fleuve San Juan présente une situation géologique très dynamique : il s'agit d'un arc insulaire qui est devenu un isthme. De ce fait, ces apports sédimentaires extraordinaires représentent un processus périodique ou cyclique qui a longtemps joué un rôle décisif dans l'évolution naturelle de la partie inférieure du bassin et est à l'origine de la capacité du fleuve San Juan à transporter des volumes significatifs de sédiments jusqu'à la mer des Caraïbes.

Le présent document récapitule les résultats d'une étude portant sur des phénomènes géologiques survenus essentiellement dans la partie costa-ricienne du bassin du fleuve San Juan, et explique comment des apports extraordinaires de sédiments s'ajoutent périodiquement aux processus naturels de production et transfert sédimentaires et de formation de delta.

Les volumes de sédiments produits lors de phénomènes exceptionnels depuis la partie supérieure du bassin, ainsi que leur fréquence potentielle et le type de sédiments, sont examinés en tant que base méthodologique pour l'élaboration de cette étude. Si celle-ci ne fournit qu'une estimation numérique préliminaire des quantités de sédiments impliquées, elle permet toutefois de mieux comprendre les dynamiques sédimentaires du fleuve San Juan.

L'auteur est professeur de sédimentologie et de géologie environnementale à l'Université du Costa Rica depuis 1991, et consultant en matière d'évaluation de l'impact sur l'environnement, de gestion de l'environnement et de l'utilisation des terrains et de l'environnement. Il est diplômé en géologie de l'Ecole de géologie de l'Université du Costa Rica (1987), et titulaire d'un doctorat en sciences naturelles de l'Université de Stuttgart en Allemagne (1996). Son CV détaillé figure à l'appendice A.

2. Géographie du bassin du fleuve San Juan

Le bassin du fleuve San Juan couvre une superficie d'environ 42 000 km². Il constitue le plus vaste bassin fluvial d'Amérique centrale (SICA, 2011). Il s'agit d'un bassin binational, qui occupe certaines parties du Nicaragua et du Costa Rica (figure 1).

Environ 70 % de ce bassin se situent au Nicaragua, et cette partie inclut le lac Cocibolca (ou lac Nicaragua) et le lac Managua. Les quelque 30 % restants se trouvent au Costa Rica (figure 1).

Le bassin s'élève depuis les plaines côtières caraïbes du Río Indio-Maíz (au Nicaragua) et du Tortuguero (au Costa Rica), et s'étend en majeure partie à une altitude égale ou supérieure à 500 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les points culminants de cette base sont des pics volcaniques qui atteignent 1500 à 3000 mètres de hauteur au Costa Rica et un peu plus de 1600 mètres au Nicaragua.

Cette topographie exerce une influence considérable sur les précipitations, qui fluctuent entre 4000 et 6000 mm dans les zones de hautes terres les plus humides, et entre 1000 et 2000 mm dans les zones plus sèches aux abords du lac Cocibolca, où la saison sèche dure environ sept mois.

Le seul exutoire du lac Cocibolca est le fleuve San Juan, qui s'écoule sur 205 km environ depuis sa source dans le lac jusqu'à la mer des Caraïbes. A son origine, le fleuve se situe entièrement en territoire nicaraguayen, mais cinq kilomètres en aval d'El Castillo, sa berge méridionale devient la frontière internationale entre les deux pays (figure 1). Le fleuve est orienté sud-est, et à quelque 174 km de sa source, à l'extrémité proximale de son delta, il se divise en deux bras : le cours inférieur du fleuve San Juan et le fleuve Colorado, qui possèdent des embouchures séparées dans la mer des Caraïbes distantes de 20 km environ.



Figure 1. Carte du bassin binational du fleuve San Juan (voir SICA, 2011).

Le réseau d'affluents se caractérise en ce que les fleuves déversant leurs eaux dans le lac Cocibolca dans la partie septentrionale du bassin sont de courte longueur, et orientés est-ouest, ouest-est et sud-nord, tandis que les affluents dont les eaux sont drainées par le fleuve San Juan depuis le nord sont orientés nord-sud.

La plupart des fleuves s'écoulant depuis le secteur méridional du bassin prennent naissance au Costa Rica dans la chaîne de montagnes de Guanacaste à l'ouest, et à des altitudes pouvant atteindre 3000 mètres dans la chaîne de Tilarán au sud-est. Les niveaux élevés de précipitations qui frappent le flanc nord de la chaîne de Tilarán contribuent à approximativement 85 % du débit d'eau du fleuve San Juan. Le débit annuel moyen du fleuve est estimé à 475 m³/s à San Carlos de Nicaragua (la source du fleuve San Juan au niveau du lac Cocibolca), et atteint 1308 m³/s à l'embouchure du fleuve Sarapiquí. Sur ce débit, 26 % provient du lac Nicaragua, 6,5 % des

apports des affluents entre San Carlos de Nicaragua et El Castillo, et 67,5 % d'affluents convergeant entre El Castillo et Sarapiquí (PROCUNCA, 1997 ; p. 86 : Régimen Hidrológico⁹).

3. Géologie du bassin du fleuve San Juan

Le bassin du fleuve San Juan est principalement situé dans l'arrière-arc du sud de l'Amérique centrale, bien que sa pointe nord-ouest forme une partie du bassin avant-arc du sud du Nicaragua (figure 2). Pour des informations exhaustives, voir Astorga *et al.* (1991).

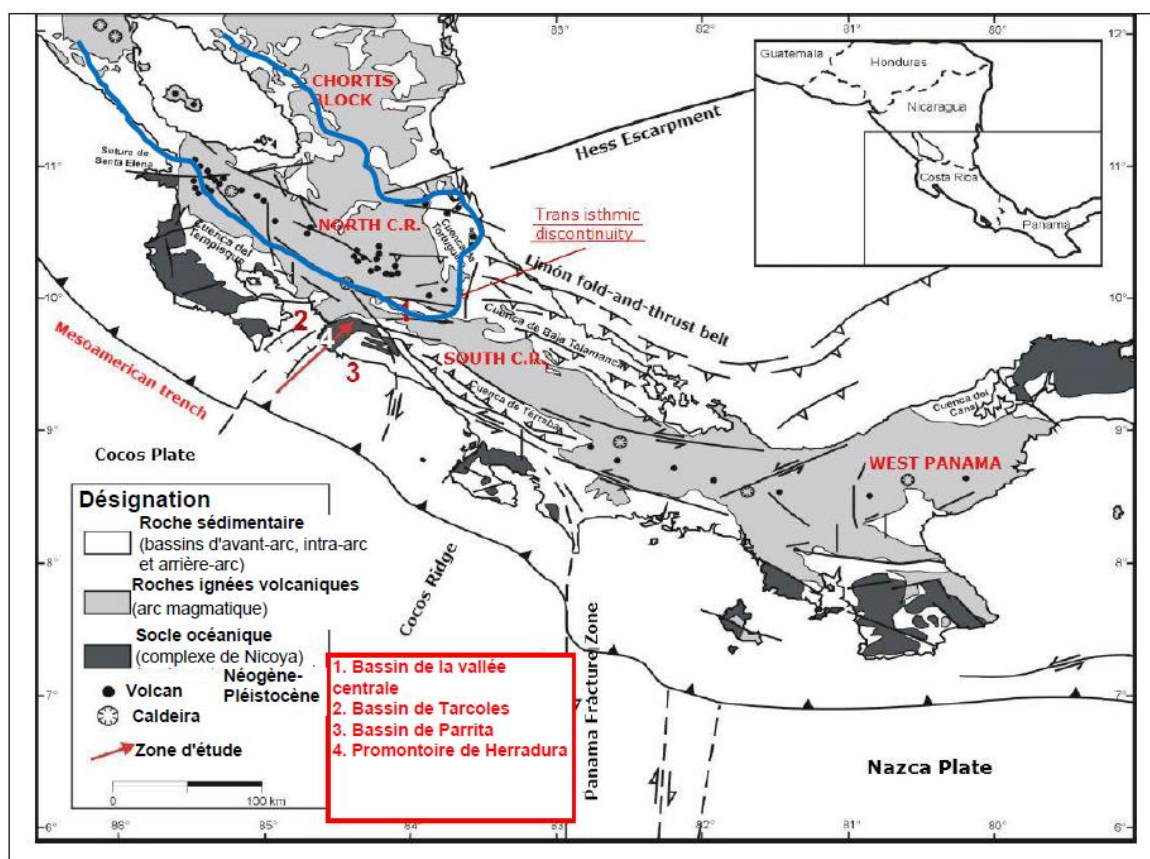


Figure 2. Carte tectonique d'une partie de l'orogène du sud de l'Amérique centrale, comportant une indication des principaux éléments tectoniques et néotectoniques liés au bassin du fleuve San Juan (ligne bleue). Comme on peut le voir, ce bassin versant se situe dans une zone d'arrière-arc et d'avant-arc au Nicaragua et au Costa Rica.

Ce bassin présente une histoire géologique complexe liée à l'évolution tectonique des blocs lithosphériques qui constituent aujourd'hui la plaque Caraïbe. Le bloc Chortis et le bloc sud de l'Amérique centrale ont évolué ensemble depuis le Paléocène supérieur (il y a 50 millions d'années), époque à laquelle ils étaient réunis par la fosse méso-américaine (voir Astorga, 1997). Auparavant, ils étaient séparés. Durant l'ère mésozoïque, ce qui forme aujourd'hui l'essentiel du bassin du San Juan, y compris la zone septentrionale du territoire costa-ricien, faisait partie de l'avant-arc du bloc Chortis.

⁹ PROCUNCA (1997) : Estudio de Diagnóstico de la Cuenca del Río San Juan y Lineamientos del Plan de Acción. Manejo Ambiental y Desarrollo Sostenible de la Cuenca del Río San Juan. Gobierno de Costa Rica. Gobierno de Nicaragua. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Unidad de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Secretaría General de la Organización de Estados Americanos. Washington, D.C. p.334 (<http://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea05s/oea05s.pdf>).

Cette évolution tectonique est attestée par la présence de fragments de croûte océanique de l'ancienne plaque Farallón, piégée et tectoniquement déformée (prismes d'accrétion) par ce que l'auteur appelle «Ofiolita de Sábalos» (voir Astorga, 1997). Il s'agit de harzburgites serpentinisées, basaltes et radiolarites mésozoïques datant probablement du Jurassique — Crétacé inférieur.

Depuis le Paléocène supérieur, les deux régions qui constituent aujourd'hui le bassin du San Juan ont évolué pour former principalement une région d'arrière-arc, avec des dépôts d'importantes successions de roches volcanoclastiques.

Cependant, au cours du Miocène tardif (et peut-être en liaison avec la réorganisation des plaques et des blocs tectoniques dans la région Caraïbes), une ouverture arrière-arc a commencé à se former. Cette ouverture est appelée bassin de San Carlos par Astorga *et al.* (1991), et est connue dans la région sous le nom de Graben du Nicaragua (voir la figure 2 ci-dessus).

Les lacs Nicaragua et Managua sont les meilleures preuves de l'existence de ce bassin de deuxième génération, toujours actif sur le plan géologique. À l'inverse, le secteur du bassin au Costa Rica a été soumis à un processus d'envasement rapide selon l'échelle de temps géologique, avec un léger soulèvement tectonique, qui a entraîné le rehaussement de cette partie du bassin, sans doute depuis le Pliocène (il y a environ 5 millions d'années).

Il est fort probable qu'avant la survenue de ce phénomène, les eaux du Graben du Nicaragua s'écoulaient en direction de la mer des Caraïbes dans un paléo-fleuve San Juan, qui suivait un cours similaire au cours actuel du fleuve. Cette situation a sans doute débuté au plus tard au Miocène moyen (il y a 10 millions d'années).

Avec le soulèvement du bassin du San Carlos au Costa Rica, l'écoulement des eaux vers le graben du Nicaragua s'est trouvé renforcé par le biais du fleuve San Juan. Ce processus a entraîné la création du bassin du fleuve San Juan tel qu'il existe actuellement et, depuis, son évolution a été relativement homogène.

4. Caractérisation générale du fleuve San Juan et de son delta

La pente du fleuve San Juan, depuis sa source dans le lac Cocibloca jusqu'à son embouchure dans la mer des Caraïbes, est limitée par un faible dénivelé d'environ 30 m seulement (figure 3).

Il s'agit d'un fleuve antécédent, ce qui signifie qu'il s'est formé avant le rehaussement des montagnes à travers lesquelles il s'écoule. Cette situation explique pourquoi le cours du fleuve «coupe» à travers de hauts plateaux à des altitudes atteignant plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres (figure 3).

Le cours en aval du lac Cocibolca peut être divisé en deux portions contrastantes : la portion de montagnes et la portion de plaines.

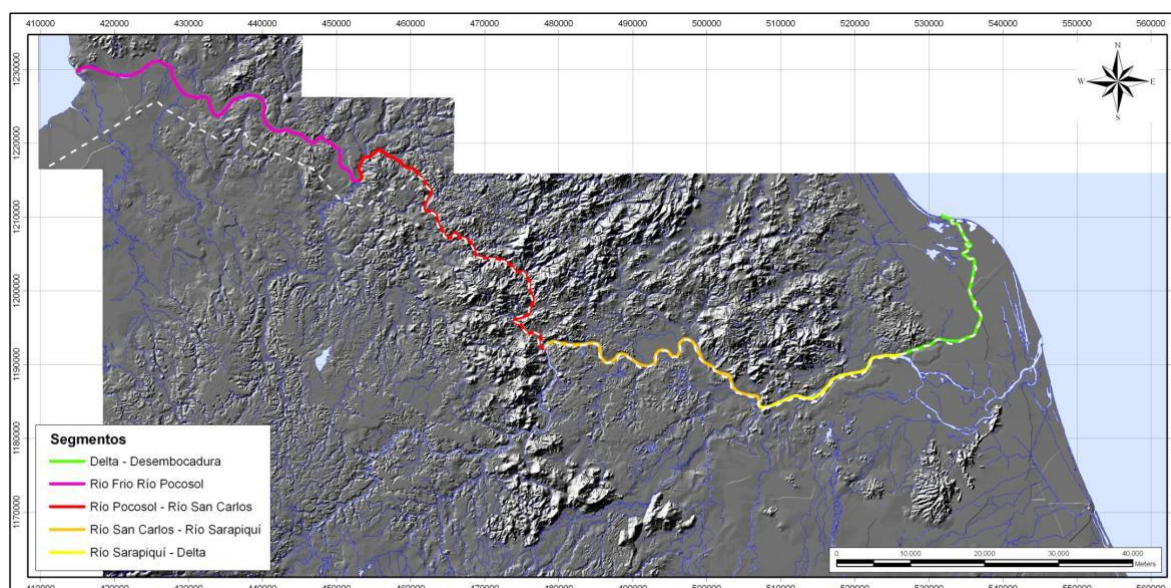


Figure 3. Cours du fleuve San Juan, qui s'écoule depuis le lac Cocibolca jusqu'à son embouchure dans la mer des Caraïbes, superposé sur un modèle numérique d'élévation. Un profil topographique du fleuve San Juan depuis le lac jusqu'à l'embouchure est représenté sous la carte. Il existe deux portions : une portion de montagnes et une portion de plaines. Ces portions peuvent être divisées en segments, qui sont indiqués sur la carte et expliqués dans le texte. Le fleuve San Juan est un fleuve antécédent, ce qui signifie qu'il est antérieur au soulèvement géologique des montagnes qu'il traverse ; ce fait atteste de l'ancienneté du fleuve, corroborée par la présence d'un delta à son embouchure qui daterait d'environ 10 millions d'années (voir le texte pour plus de détails).

La portion montagneuse s'étend depuis sa source au lac Cocibolca jusqu'à l'embouchure du fleuve San Juan. Cette portion peut être divisée en deux sous-portions : a) Río Frío — Pocosol et b) Pocosol — fleuve San Carlos. C'est la sous-portion inférieure du fleuve, là où la roche du lit se trouve exposée, qui comporte le plus grand nombre de «rapides» (figure 3).

Cette portion se caractérise par le fait que le fleuve San Juan coupe à travers la topographie du terrain, sa vallée fluviale étant resserrée entre des chaînes montagneuses. D'une manière générale, le gradient du lit, ou la pente, est plus prononcé dans cette portion que dans la portion de plaines en aval.

La portion de plaine s'étend depuis l'embouchure du fleuve San Carlos jusqu'à l'embouchure du fleuve San Juan, dans la mer des Caraïbes. Elle peut également être divisée en sous-portions (figure 3) : a) fleuve San Carlos — fleuve Sarapiquí ; b) fleuve Sarapiquí — Delta ; et c) Delta — embouchure. Cette portion présente une pente ou un gradient moins prononcé que la portion montagneuse en amont.

Dans la portion de plaine, la vallée fluviale du fleuve San Juan est plus large et plus ouverte, généralement non resserrée par les chaînes de montagne adjacentes, à quelques exceptions près sur la rive gauche de la sous-portion fleuve Sarapiquí — Delta.

Le fleuve San Juan se sépare en deux bras au niveau de Delta Costa Rica, qui constitue le début de la sous-portion Delta — embouchure du fleuve (figures 3 et 4). Le fleuve San Juan continue depuis Delta Costa Rica jusqu'à son embouchure dans la mer des Caraïbes, au niveau de la baie de San Juan del Norte, mais la majeure partie du débit (probablement 80 à 90 %) passe dans le fleuve Colorado, qui se jette dans la mer des Caraïbes à environ 20 km au sud-est. L'origine de cette séparation s'explique par le fait que Delta Costa Rica se situe à l'extrémité proximale du delta du fleuve, qui accumule des sédiments en direction de l'est depuis au moins 10 millions d'années (figure 4). Pour des informations exhaustives, voir Astorga *et al.* (1991).

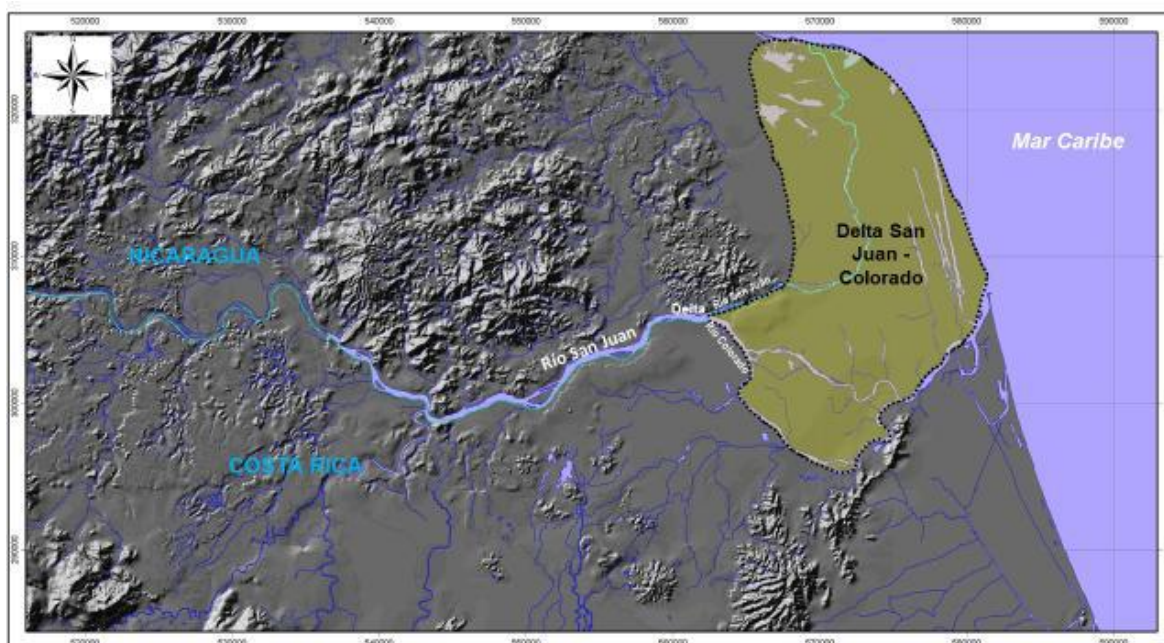


Figure 4. Sous-portion inférieure du fleuve San Juan. Au niveau de Delta Costa Rica, le fleuve se sépare en deux bras pour former le cours inférieur du fleuve San Juan et le fleuve Colorado. La structure de failles de croissance (ou failles listriques) parallèles à la côte dans le front deltaïque de ce système sédimentaire formé par l'avancée orientale du delta commence à cet emplacement. On note que cette région inclut environ 250 km² de zones humides qui s'étendent entre les deux pays.

L'interprétation des lignes de sismique-réflexion par Astorga *et al.* (1991) a permis d'identifier un modèle important de failles de croissance (ou failles listriques) parallèles à la côte dans le front deltaïque de ce système sédimentaire (figure 5). Ces failles géologiques semblent avoir joué un rôle majeur dans le contrôle et l'évolution de la ligne de rivage associée au delta.

Ces éléments ont sans doute été formés au cours des 10 derniers millions d'années par l'avancée orientale du delta du cours inférieur du San Juan et du fleuve Colorado, qui s'est étendu en se prolongeant en direction de la mer pour créer un delta d'une superficie d'au moins 1000 km, aujourd'hui submergé pour l'essentiel. Durant cette période, il a toutefois provoqué l'augmentation de la zone de plaine côtière de 1250 km² environ.

Les travaux de ces auteurs ont également mis en lumière une autre structure géologique, la faille de Hess (ou escarpement de Hess), qui pénètre dans la côte en suivant une direction approximativement nord-est à sud-est aux environs de l'embouchure du cours inférieur du fleuve San Juan.

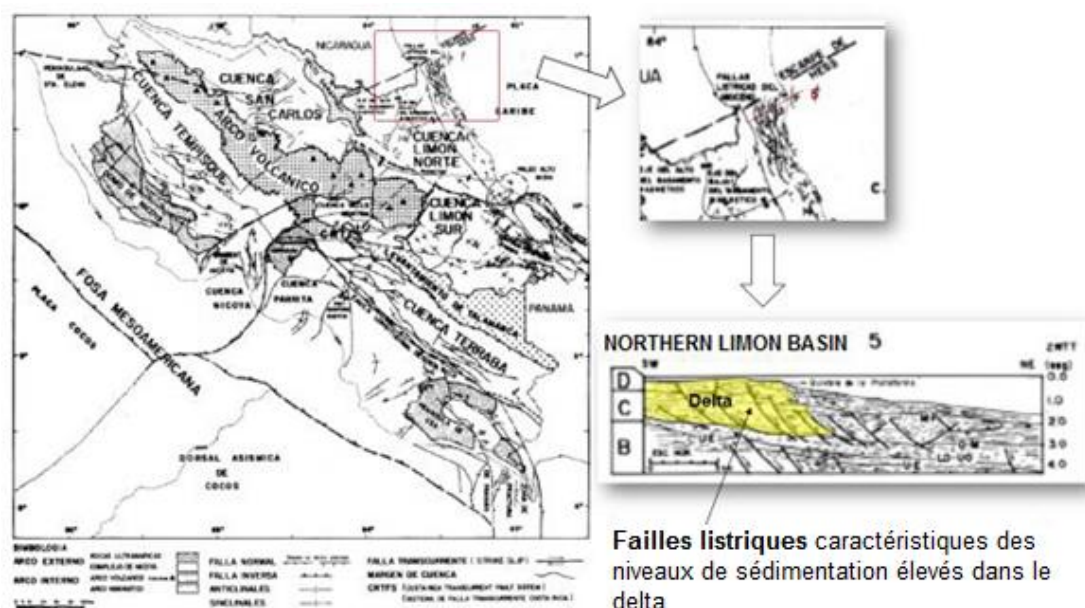


Figure 5. Schémas tirés de l'article d'Astorga et al. (1991), qui montrent la structure tectonique du Costa Rica, en mettant en particulier en exergue le delta du système San Juan — Colorado. Ce profil résulte de l'interprétation des sections de sismique-réflexion dans le delta, qui indiquent l'âge maximal de la structure au Miocène (il y a 10 millions d'années environ) et la présence de nombreuses failles listriques parallèles à la côte, faisant ainsi ressortir des taux de sédimentation élevés ainsi qu'un possible processus de contrôle tectonique et néotectonique dans le système de sédimentation du delta.

5. Apports sédimentaires extraordinaires causés par des phénomènes géologiques dans la partie costa-ricienne du bassin du fleuve San Juan

La figure 6 montre le modèle numérique d'élévation de la partie costa-ricienne du bassin du fleuve San Juan. Ce modèle indique les principales sources extraordinaires de sédiments en direction du fleuve San Juan. Onze structures volcaniques actuellement actives, dont certaines complexes (stratovolcans), sont indiquées sur la carte, notamment les volcans Rincón de la Vieja, Arenal, Poas et Turrialba.

Les apports sédimentaires extraordinaires dans le bassin se définissent comme tous les apports résultant de phénomènes géologiques «catastrophiques» ou «exceptionnels», directement associés à des éruptions volcaniques (coulées pyroclastiques et lahars) et des séismes de magnitudes supérieures à 6.0, qui produisent un grand nombre de glissements de terrain (figure 7). Les principales inondations ne sont pas incluses, car elles se répercutent sur le système fluvial essentiellement par le transport de gros volumes de sédiments, mais ne représentent pas nécessairement une source principale de nouveaux sédiments.

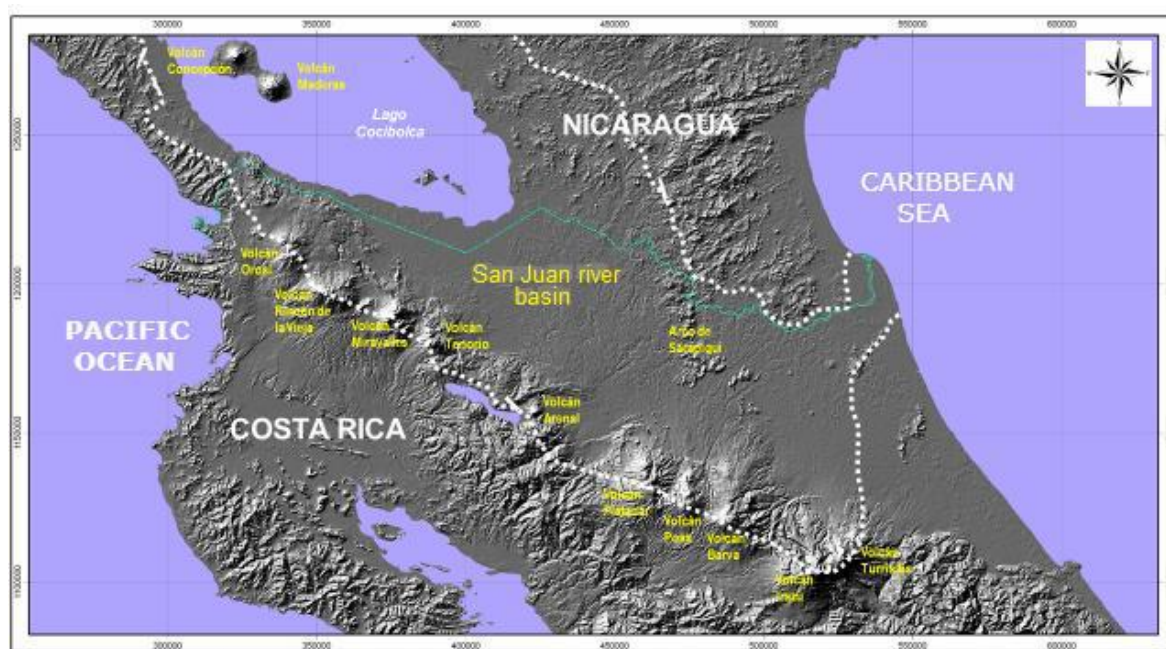


Figure 6. Apports sédimentaires extraordinaires dans le fleuve San Juan, provenant de la partie costa-ricienne du bassin. Il convient de noter qu'il existe au moins onze volcans actuellement ou potentiellement actifs dont les altitudes varient entre 2000 et 3000 m au-dessus du niveau de la mer, qui contribuent périodiquement à l'apport de volumes extraordinaires de sédiments dans le bassin.

La figure 8 présente une chronologie des «événements sismiques (tremblements de terre) et éruptions volcaniques historiques enregistrés dans la partie costa-ricienne du bassin du fleuve San Juan» au cours des trois derniers siècles.

Les séismes de magnitudes supérieures à 6.0 ont été inclus dans cette compilation, car on sait qu'ils induisent des glissements de terrain dans les parties supérieures des sous-bassins du Costa Rica (figure 7), tout comme des éruptions volcaniques apportant des sédiments aux sous-bassins, en particulier par la formation de coulées de boues volcaniques (appelées lahars).

La figure 8 montre qu'une éruption volcanique majeure au sein de la partie costa-ricienne du bassin du fleuve San Juan se produit tous les 40 ans environ. Les séismes surviennent plus fréquemment : en moyenne treize par siècle.

En conclusion, un événement «catastrophique» ou «exceptionnel» fournissant un apport extraordinaire de sédiments dans le bassin se produit en moyenne tous les vingt ans.

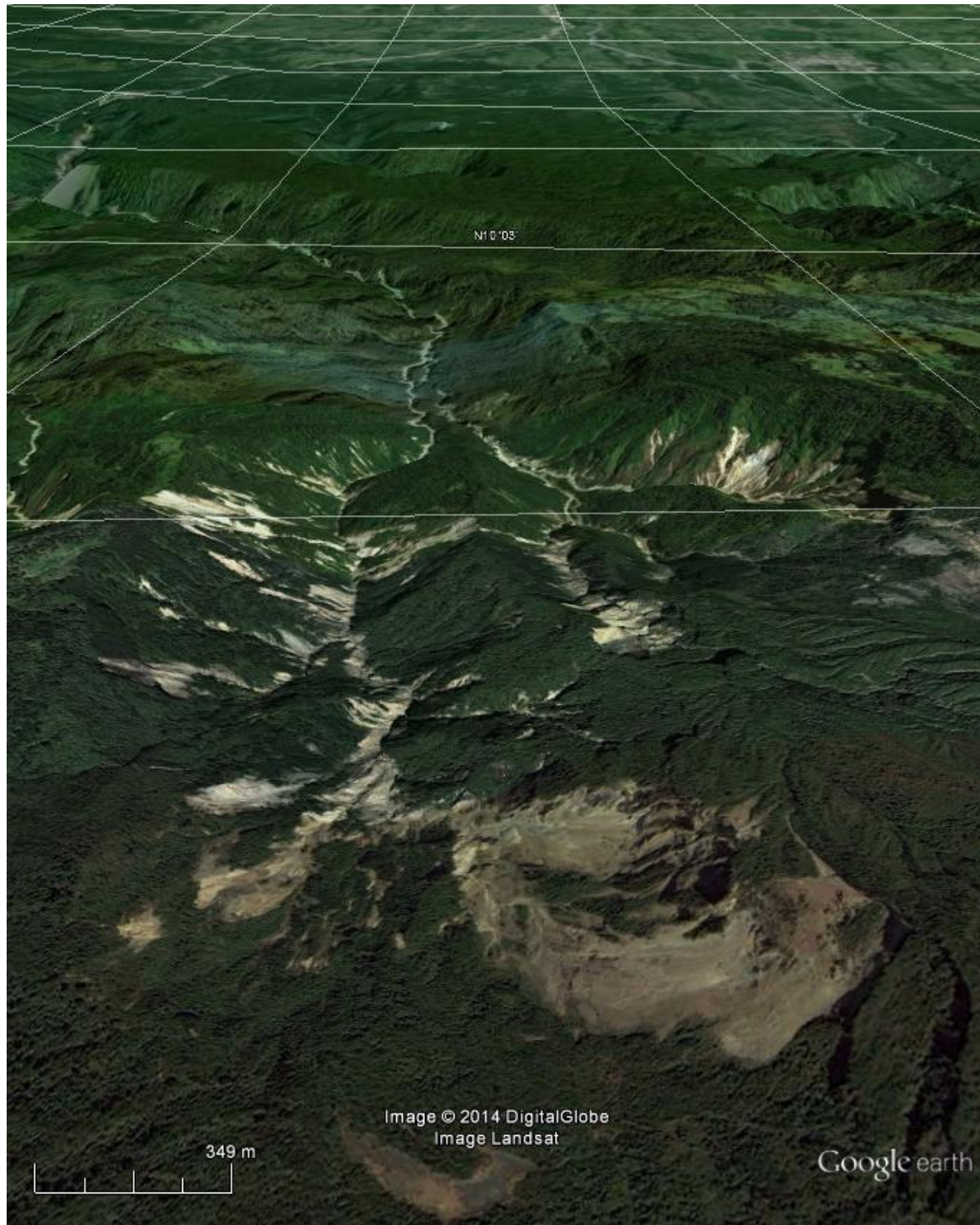


Figure 7. Processus d'érosion naturelle se produisant dans la partie supérieure du volcan Irazú (pour son emplacement approximatif, se reporter à la flèche rouge sur la figure 6). De nombreux séismes de grande envergure alimentent en sédiments les cours d'eau qui s'écoulent à travers la chaîne de montagnes volcaniques en direction du nord, en particulier dans les bassins des affluents du San Carlos et du Sarapiquí, à l'intérieur du bassin du fleuve San Juan. Les sédiments sont constitués de graviers, sable, vase et argile en pourcentages différents. Le transport de l'argile, de la vase et du sable fin étant plus facile, ceux-ci sont charriés directement jusque dans le fleuve San Juan durant la saison des pluies.

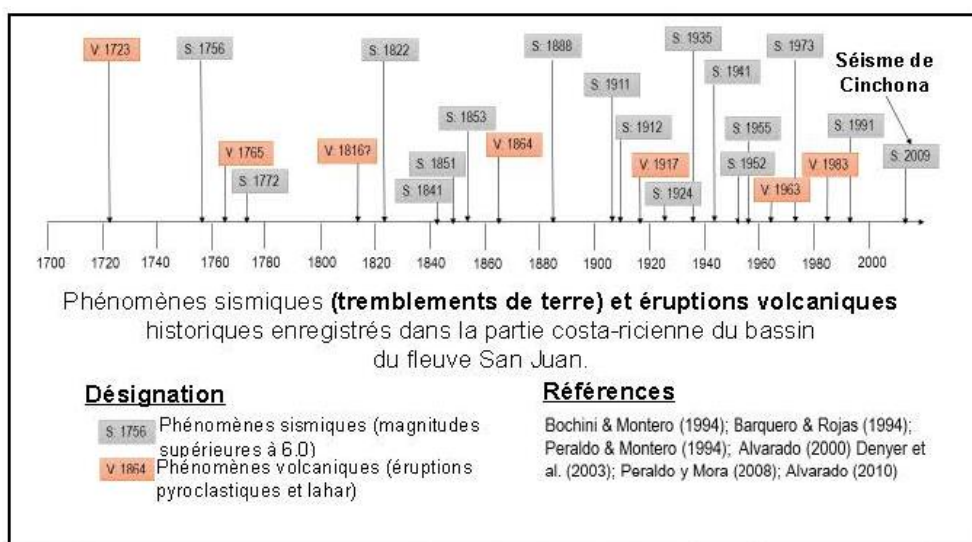


Figure 8. Apports sédimentaires extraordinaires dans le fleuve San Juan, provenant de la partie costa-ricienne du bassin. Il convient de noter qu'il existe au moins onze volcans actuellement ou potentiellement actifs dont les altitudes varient entre 2000 et 3000 m au-dessus du niveau de la mer, qui contribuent périodiquement à l'apport de volumes extraordinaires de sédiments dans le bassin, et que la fréquence des séismes est supérieure à celle des éruptions volcaniques.

Les informations techniques relatives aux caractéristiques détaillées de ces phénomènes extraordinaires restent limitées, car les études géologiques systématiques n'ont débuté au Costa Rica qu'à la création de l'Ecole de géologie d'Amérique centrale à l'Université du Costa Rica, dans les années 1970. Toutefois, les données historiques compilées par les auteurs cités dans la figure 8 indiquent que ces phénomènes génèrent des apports sédimentaires extraordinaires (associés à des glissements de terrain et/ou coulées de boue) dans les systèmes d'écoulement des eaux des tributaires charriant les sédiments jusqu'au fleuve San Juan, soit rapidement (pour les sédiments fins), soit plus progressivement (dans le cas des sédiments grossiers).

Dans ce contexte, il convient de mentionner le cas du séisme de Cinchona, un phénomène d'une magnitude de 6,2 qui s'est produit le 8 janvier 2009 dans la chaîne volcanique centrale du Costa Rica, à l'intérieur du bassin du fleuve San Juan.

Selon Alvarado (2010), le volume total de sédiments générés par ce phénomène sismique se situait entre 2,5 et 3,5 millions de m³, ce qui équivaut à un volume de 4 à 5 millions de tonnes. Les sédiments allaient des argiles aux gros blocs de roche volcanique, qui se fragmentaient durant le transport. Alvarado (2010) indique la survenue de nombreux glissements de terrain et coulées de boue provoqués par le séisme, à des vitesses allant de 4,8 à 13,3 m/s dans les zones à forts gradients, et de 10 à 2,5 m/s dans les zones de faibles gradients suite au tremblement de terre (figures 9 et 10).

Alvarado (2010) souligne que les impacts sédimentaires du séisme de Cinchona ont été corroborés dans la littérature internationale (Keefer & Wilson, 1989), centre-américaine (Devoli *et al.*, 2009) et costa-ricienne (Mora & Mora, 1994) qui «établissent la relation entre la magnitude des séismes, la zone touchée, la zone de glissement de terrain et la production de coulées de boue, notamment». L'accent est mis sur le fait que les coulées de boues et glissements de terrain majeurs découlent de séismes de magnitudes supérieures à 5,2 (Mora & Mora, 1994). Dans le cas du séisme de Cinchona, selon Alvarado (2010), la zone touchée s'étendait sur une superficie de 200 km² environ, avec 349 glissements enregistrés sur une superficie de 21,7 km² caractérisée par l'effondrement des pentes (figure 9). Il s'agissait clairement d'un phénomène extraordinaire en termes de quantité de sédiments pénétrant brusquement dans le bassin versant.

Etant donné les caractéristiques des sédiments produits, on estime qu'environ 50 % des apports de matériaux dans les cours d'eau et les fleuves dus à ces glissements de terrains présentaient un spectre granulométrique compris entre celui de l'argile et du sable. Ceci tend à indiquer que les systèmes fluviaux dont les eaux s'écoulent sur le flanc septentrional des montagnes charrient ces sédiments jusqu'au fleuve San Juan en l'espace de plusieurs semaines à plusieurs mois.

Ainsi, on peut en conclure qu'un an après un tel phénomène exceptionnel dans la partie supérieure du bassin, les composants fins des matériaux constituant un apport extraordinaire (qui représente entre 10 et 50 % du volume total) sont susceptibles d'atteindre le fleuve San Juan, avant d'être transportés jusqu'à ses embouchures deltaïques dans la mer des Caraïbes.

Sur la base de la chronologie des phénomènes connus et des informations recueillies suite au séisme de 2009, il est possible de conclure que le fleuve San Juan a reçu des apports extraordinaires de sédiments (en particulier de l'argile, de la vase et du sable fin) dans des volumes variés à approximativement 20 ans d'intervalles, ces apports se produisant sur une durée allant de plusieurs mois à un an maximum environ.

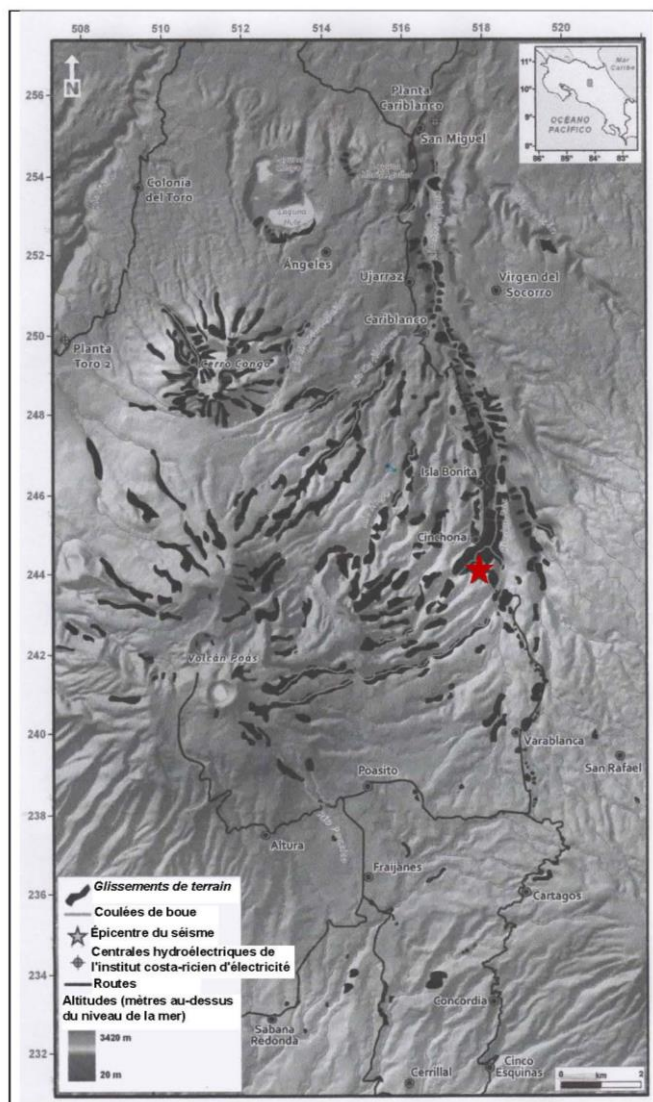


Figure 9. Les zones marquées en noir représentent les glissements de terrain qui se sont produits suite au séisme de Cinchona de 2009. L'étoile indique le site de l'épicentre. Imagée tirée d'Alvarado (2010).



Figure 10. Photographies des glissements de terrain survenus en janvier 2009, montrant les types de dégâts provoqués par le séisme de Cinchona (pour son emplacement, voir figure 9).

Ceci permet d'établir que le fleuve San Juan a été soumis à des apports extraordinaires de sédiments durant des siècles et qu'il a la capacité de charrier de tels apports sédimentaires, en particulier en raison de sa résilience morphologique à transporter des sédiments supplémentaires qui viennent s'ajouter périodiquement, mais exceptionnellement, à la charge annuelle résultant des processus normaux d'érosion qui se produisent de manière semi-continue dans le bassin hydrographique.

Cette étude a démontré que les phénomènes géologiques survenant périodiquement (tous les 20 ans en moyenne) dans la partie costa-ricienne du bassin sont à même de procurer de manière soudaine des apports exceptionnels de sédiments dans le système fluvial, qui représentent entre 1 et sans doute 4 ou 5 millions de tonnes supplémentaires de sédiments. Ces phénomènes ont été enregistrés pendant plusieurs siècles, et ils surviennent probablement depuis plusieurs millénaires, voire 10 millions d'années. Il s'ensuit que les effets environnementaux sur les conditions écologiques du fleuve ne sont pas significatifs, car le système fluvial et l'écosystème se sont adaptés à ces conditions et phénomènes.

L'apport supplémentaire de sédiments représenté par la construction de la route 1856 doit être examiné dans ce contexte.

D'après les mesures les plus récentes d'érosion des pentes (sur la base d'études de terrain menées sur toutes les pentes le long de la route 1856, incluses dans le rapport Mende de 2014), ajoutées aux estimations d'érosion de la plate-forme de la route proprement-dite figurant dans le rapport de l'ICE de 2014, et dans l'hypothèse où le ratio de production des sédiments est égal à 0,6, la limite supérieure du volume d'apport sédimentaire dans le fleuve San Juan résultant de la construction de la route, selon le scénario le plus défavorable en matière de précipitations, est estimée à environ 75 000 tonnes par an. Ceci représente environ 1,5 à 7,5 % de la charge périodiquement fournie au réseau hydrographique par des phénomènes géologiques naturels.

Compte tenu du cadre géologique du bassin du fleuve San Juan et de la longue période durant laquelle il a reçu par intermittence des apports extraordinaires de sédiments, l'on peut en conclure que les impacts environnementaux des apports supplémentaires de sédiments provenant de la construction de la route 1856 sont minimes. C'est en particulier le cas si l'on prend en considération le fait que les apports périodiques découlant de phénomènes géologiques naturels peuvent être 10 à 60 fois supérieurs à l'apport produit par les sédiments de la route 1856.

6. Conclusions

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes.

1. Le bassin hydrographique du fleuve San Juan est un bassin binational qui couvre une superficie d'un peu plus de 42 000 km². Environ 70 % de ce bassin se situent au Nicaragua, et les 30 % restants sont au Costa Rica.
2. Sur le plan géologique, le bassin hydrographique du fleuve San Juan se trouve dans deux zones géologiques différentes : l'arc volcanique et l'arrière-arc. La situation géologique découle du fait que les parties les plus élevées de ce bassin sont formées de volcans, encore en activité pour certains.
3. Les lacs Nicaragua et Managua, ainsi que la partie septentrionale du Costa Rica, connue sous le nom de bassin du San Carlos, forment une structure géologique d'arrière-arc, tectoniquement contrôlée, née 15 à 20 millions d'années plus tôt (durant le Miocène inférieur). A l'origine, cette zone était recouverte par la mer, mais il y a environ 10 millions d'années elle s'est trouvée séparée, formant ainsi un grand lac d'eau douce. L'écoulement des eaux se faisait par un ancien fleuve San Juan, dont l'embouchure se situait à l'Est, à proximité de l'embouchure actuelle du fleuve.
4. Au cours de ces 10 derniers millions d'année, le fleuve San Juan a formé un delta (le delta San Juan — Colorado) sur une superficie d'environ 1250 km² et une épaisseur de l'ordre de 4500 mètres. Ce delta résulte de l'accumulation de littéralement plusieurs milliards de mètres cubes de sédiments.
5. L'existence du delta San Juan — Colorado témoigne de l'existence de processus naturels d'érosion, de transport et de dépôt de sédiments qui durent depuis 10 millions d'années environ. Outre cet apport sédimentaire «normal», des apports extraordinaires de sédiments causés par des phénomènes sismiques et volcaniques ont périodiquement eu lieu.
6. L'enregistrement de phénomènes géologiques dans la partie costa-ricienne du bassin du fleuve San Juan durant les trois derniers siècles (c'est-à-dire de séismes et éruptions volcaniques ayant entraîné glissements de terrain et coulées de boue) indiquent que ces phénomènes se produisent en moyenne tous les 20 ans environ. Tout au long des mois, voire de l'année, qui suivent, ils génèrent des apports extraordinaires de sédiments dans les affluents dont les eaux sont drainées par le fleuve San Juan.
7. Ainsi, le séisme de Cinchona de 2009, dont l'épicentre se situe sur la pente septentrionale du volcan Poás au Costa Rica et dans le bassin du fleuve San Juan, aurait provoqué 349 glissements de terrain sur une superficie de 21,7 km² autour de l'épicentre. Sur les 2,5 à 3,5 millions de m³ de sédiments libérés, la moitié environ aurait atteint le fleuve San Juan au cours des 12 mois qui ont suivi le phénomène.
8. Des phénomènes sismiques similaires (et plus marqués) s'étant produits dans le bassin des siècles durant, le fleuve San Juan a acquis la capacité à transporter de lourdes charges sédimentaires de volumes variables jusqu'à son delta, ainsi que la résilience morphologique à absorber des hausses extraordinaires d'apports de sédiments suite à des phénomènes exceptionnels.

9. Mesurant la capacité naturelle du fleuve San Juan à transporter des charges de sédiments importantes et très variables, j'en conclus que la charge sédimentaire supplémentaire produite temporairement par la construction de la route 1856, estimée à 75 000 tonnes/an, est insignifiante comparée à la charge sédimentaire naturelle transportée par le fleuve et la variabilité de cette charge résultant de la situation géologique.

.....

ANNEXE 11

**CONSEJO NACIONAL DE VIALIDAD (CONAVI), WORKS ON NATIONAL
ROAD 856 : BEFORE AND AFTER, DECEMBER 2014**

[Annexe non traduite]

ANNEXE 12

**COMISIÓN DE DESARROLLO FORESTAL DE SAN CARLOS (CODEFORSA), RESTORATION AND
REHABILITATION OF ECOSYSTEMS AFFECTED BY THE CONSTRUCTION OF THE JUAN RAFAEL
MORA PORRAS BORDER ROAD, ROUTE 1856. QUATERLY REPORT, NOVEMBER 2014**

[Annexe non traduite]

ANNEXE 13

**COMISIÓN DE DESARROLLO FORESTAL DE SAN CARLOS (CODEFORSA), CONSULTING
SERVICES FOR THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN ENVIRONMENTAL
PLAN FOR THE JUAN RAFAEL MORA PORRAS BORDER ROAD, REPORT
OF CONTRACT SINAC-CDE-004-2012, NOVEMBER 2014**

[Annexe non traduite]

ANNEXE 14

**CENTRO CIENTÍFICO TROPICAL (CCT), FOLLOW-UP AND MONITORING STUDY
ROUTE 1856 PROJECT- EDA ECOLOGICAL COMPONENT, JANUARY 2015**

[Annexe non traduite]
