L'événement climatique extrême tropical (ECET) du 21 novembre 2006 : analyse hydro-géomorphologique et gestion intégrée des bassins versants hydrographiques tropicaux

**Fernando Diaz del Olmo, Jean-Noël Salomon, José Ramón Martínez
Batle et Rafael Cámara Artigas**

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/com/5583>

DOI : 10.4000/com.5583

ISSN : 1961-8603

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 avril 2009

Pagination : 219-240

ISBN : 978-2-86781-545-9

ISSN : 0373-5834

Référence électronique

Fernando Diaz del Olmo, Jean-Noël Salomon, José Ramón Martínez Batle et Rafael Cámara Artigas,
« L'événement climatique extrême tropical (ECET) du 21 novembre 2006 : analyse
hydro-géomorphologique et gestion intégrée des bassins versants hydrographiques tropicaux », *Les
Cahiers d'Outre-Mer* [En ligne], 246 | Avril-Juin 2009, document 3, mis en ligne le 01 avril 2012, consulté
le 30 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/com/5583> ; DOI : 10.4000/com.5583

L'évènement climatique extrême tropical (ECET) du 21 novembre 2006 : analyse hydro-géomorphologique et gestion intégrée des bassins versants hydrographiques tropicaux

DIAZ del OLMO Fernando¹

SALOMON Jean-Noël²

MARTINEZ BATLE José Ramón³

CÁMARA ARTIGAS Rafael⁴

L'existence de phénomènes climatiques extrêmes tropicaux (ECET) tels que sécheresses, tempêtes, pluies diluviennes, cycles de températures minimales ou maximales, etc., est une constante dans les systèmes naturels. Il s'agit d'évènements que la statistique classique identifie comme « hors norme » car leur présence s'interprète comme anormale.

À partir de la décade des années 1990, ces évènements ont cessé d'être considérés comme anormaux (il s'agit bien d'anormaux = qui s'écartent de la norme, de la règle générale et non anormaux) pour s'incorporer comme caractéristique spécifique des systèmes terrestres fluctuants, en considérant aussi bien les arguments climatiques particuliers que les systèmes géo-écosystémiques généraux. La nouvelle interprétation a été rendue possible grâce au recours à de nouvelles techniques télématiques de recherche et de modélisation qui offrent la possibilité d'intégrer des données dynamiques en temps réel et à grande échelle (au niveau du détail). Cela permet aussi d'aborder la prospective locale ou régionale dans le cadre du changement climatique

1. Departamento de Geografía Física, Universidad de Sevilla ; mél : delolmo@us.es

2. LGPA, UFR de Géographie Louis Papy, Université Michel de Montaigne – Bordeaux 3 ; mél : jnsalomon@yahoo.com

3. OTC-AECL, Panama et Departamento de Geografía Física, Université de Séville. mél : pelempto@gmail.com

4. Departamento de Geografía Física, Universidad de Sevilla ; mél : rcamara@us.es

global et des risques environnementaux. Depuis les deux dernières décennies, la multiplication des ouragans dans la zone Caraïbe (fig. 1) a été d'autant plus mise en relation, par certains, avec le réchauffement climatique global que la température moyenne des eaux de surface a augmenté de 2 °C (27 °C en 1995 et 29 °C en 2005). Les événements dramatiques liés aux passages successifs de Katrina (fin août 2005), Rita et Wilma (2005), trois des cyclones les plus forts enregistrés dans la région (Salomon, 2006), ont monopolisé toutes les attentions et occulté d'autres catastrophes climatiques dévastatrices.

En prenant comme référence les récents apports de Beniston et Sephenson (2004), et Beniston et Goyette (2007) ainsi que les autres travaux des *Special Issues* de *Global and Planetary Change* (n° 44 et 57), nous appellerons événements climatiques à caractères extrêmes (*Extreme Climatic Events*, ECE) l'ensemble des manifestations climatiques inhabituelles mais ayant une certaine fréquence de retour, qui se déplacent dans une série temporelle de forte intensité au-dessus ou au-dessous, des valeurs médianes ou modales.

Dans le domaine sous influence climatique tropicale Atlantique de la région Caraïbe, entre 10° et 25° de latitude N et 60° à 90° de longitude W, avec de grandes îles (« îles continentales », CAMARA *et al.*, 2005) et des reliefs dépassant 2 000 m, les ECE associés à des épisodes de pluies et de vents extraordinaires d'intensité et de rapidité d'intervention, sont fréquents et variables (Pagney, 1966 ; Demangeot, 1999 ; Marshall *et al.*, 2001). En montrant des différences ostensibles dans l'intensité des processus de la séquence des facteurs déclencheurs, nous penchons en faveur d'une référence aux « Événements Climatiques Extrêmes Tropicaux » (ECET). Leur existence engendre, sur les bassins versants hydrographiques des moyennes montagnes et sur les plaines côtières, de forts risques géomorphologiques et d'inondation.

Dans cet article est analysé succinctement l'ECET du 21 novembre 2006 survenu sur le versant caraïbe de Panama. Ce jour-là, le débit du *río* Miguel de la Borda a atteint plus de 3 400 m³/s, s'écoulant sur la plaine d'inondation du village de Guásimo (district de Donoso, province de Colón), c'est-à-dire plus de 100 fois son module annuel. Le niveau de l'eau monta de 11 m au-dessus de celui du module ordinaire du mois correspondant, dépassant de 1 m les toits des habitations se trouvant dans la plaine alluviale et provoquant la destruction de la localité (photo 1).

2 – Le bassin hydrographique du *río* Miguel de la Borda sur la Costa Abajo de Colón

Le territoire Costa Abajo de Colón s'intègre dans le contexte littoral des Caraïbes de Panama situé à l'ouest de la Baie de Limón où se trouvent l'embouchure du *río* Chagres et le Canal de Panama. Administrativement, Costa

Figure 1. – L'augmentation du nombre d'ouragans entre la période 1985-1994 et celle de 1995-2005.

(source : National Hurricane Center)

Photo 1. – Guásimo le 22 novembre 2006. Au centre, les maisons qui ont résisté à l'inondation (environ 8). En haut à droite, on devine le lit ordinaire du río (souligné par le rideau discontinu d'arbres), l'eau s'écoulant vers la droite. En bas à gauche, se trouve le cimetière qui a été épargné. (Vue aérienne fournie gracieusement par le Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC)).

Photo 2. – Lit et plaine alluviale du río Miguel de la Borda dans la localité de Guásimo, après l'ECET du 21 novembre 2006. À gauche, dans le lit, on observe la lame d'eau du río à son module ordinaire. L'extrémité supérieure de la mire tenue par le personnage indique le niveau maximal (+ 11 m par rapport au niveau normal) atteint par les eaux au cours de la pointe de crue.

Abajo regroupe les districts de Donoso et Chagres ainsi qu'une petite portion du district de Colón, les trois étant dans la province de Colón. Par ses liens commerciaux et ses services, il inclut également une partie du bassin du río Indio du district de Penonomé, de la province de Coclé (fig. 2).

Figure 2. – Bassin versant du río Miguel de la Borda. Le tracé bleu correspond au cours le plus long avec une longueur totale d'environ 52 km, depuis sa source à La Negrita jusqu'à son embouchure à Miguel de la Borda.

Le bassin hydrographique du río Miguel de la Borda s'inscrit dans ce cadre territorial, entre les parallèles 8° 51' 25" et 9° 9' 30" de latitude N et les méridiens 80° 12' 50" et 80° 30' 25" de longitude W, affectant deux districts : quelque 85 % de sa surface pour celui de Donoso et le reste dans celui de Penonomé. Il abritait une population de 4 718 habitants selon le recensement de 2000 (tabl. 1). Comme il n'y a pas de route, les communications se font par les principales rivières, et dans une moindre mesure, leurs affluents.

Données	Valeurs
Localités	199
Population (en 2000)	4 718 habitants
Population en plaine de plus de 1 km ²	1 347 habitants (~1/3)

Tableau 1. – Quelques données humaines du bassin versant.

Le transfert de passagers et de marchandises par le *réo* principal est quotidien, notamment entre les localités de Guásimo et Miguel de la Borda, cette dernière se trouvant à l’embouchure du *réo*.

Avec une superficie de 565 km², le bassin versant possède une forme de type lobulé-aplati avec un apex pointé vers le Nord. Son altitude moyenne est de 110 m, avec un point culminant à 440 m et un minimum au niveau de la mer Caraïbe. La pente moyenne est de 14,84 % (8.45°), avec un maximum de 120 % (50.3°) et un minimum de 0 %. Il s’agit d’un bassin hydrographique sans régulation hydraulique, sans barrage ni dérivation (fig. 2 ; tabl. 2 et 3⁵).

Caractéristiques	Valeurs
Superficie drainée	565 km ²
Superficie dans le district de Donoso (Colon)	480 km ²
Superficie dans le district de Penonomé (Coclé)	85 km ²
Périmètre	176 km
Indice de compacité (coefficient de Gravellius)	2,07
Coefficient de drainage	0,97
Altitude maximale	440 m

Tableau 2. – Principales caractéristiques du bassin versant du *réo* Miguel de la Borda.

Caractéristiques	Valeurs
Longueur du cours d’eau le plus long	63 km
Longueur totale des cours d’eau	
Classification (Strahler, 1/50 000)	6
Hauteur de la source (La Negrita)	270 m
Embouchure (Miguel de la Borda)	0 m
Hauteur moyenne du lit	60 m
Pente moyenne du <i>réo</i>	0,50 %
Indice de sinuosité	1,26
Nombre de tronçons	4

Tableau 3. – Caractéristiques hydrographiques du bassin versant du *réo* Miguel de la Borda.

5. * Pour le calcul des longueurs totales et la classification, le critère retenu a été : « les cours qui drainent des superficies égales ou supérieures à 0,25 km² ».

Il est à noter d'une part que le coefficient de Gravelius (2,07) indique une assez grande compacité, ce qui est un facteur favorable à la concentration des eaux vers le *río* Miguel de la Borda qui se trouve plus ou moins en position axiale, et d'autre part que le coefficient de drainage est faible, ce qui indique également une assez forte concentration des eaux dans les rivières. Ces deux facteurs se cumulent pour rendre encore plus dangereux des événements comme l'ECET du 21 novembre 2006.

Au cours de son parcours le plus long et à partir des caractéristiques de son profil longitudinal, on distingue quatre grands tronçons sur le *río* Miguel de la Borda (fig. 2) :

- le tronçon amont, depuis la localité de La Negrita (269 m) jusqu'à La Fuente (106 m), avec un parcours de 5 km (9 % de la longueur du *río*), un dénivelé de 163 m et une pente moyenne de 3,26 % (1.86°).
- le tronçon moyen-haut, depuis La Fuente (106 m) jusqu'à Los Chorritos (33 m), avec une longueur approximative de 22 km (42 % de la longueur totale du cours d'eau), un dénivelé de 73 m et une pente moyenne de 0,33 % (0.19°).
- le tronçon moyen-bas, depuis Los Chorritos (33 m) jusqu'à La Coca (19 m), avec une longueur approximative de 10 km (19 % de la longueur totale du cours d'eau), un dénivelé de 14 m et une pente moyenne de 0,14 % (0.08°).

Figure 3. – Profil longitudinal du lit majeur du *río* Miguel de la Borda (52 km de long), avec segmentation des tronçons haut, moyen-haut, moyen-bas et bas (exagération de l'axe vertical x 200).

– le tronçon aval, depuis La Coca (19 m) jusqu'à l'embouchure à Miguel de la Borda (0 m), avec une longueur approximative de 15 km (30 % de la longueur totale du cours d'eau), un dénivelé de 19 m et une pente moyenne de 0,12 % (0.07°).

À partir de la confluence entre les *ríos* Clarito et Manguesal le cours principal prend le nom de Miguel de la Borda, et à partir de l'entrée du *río* Miguelito, il acquiert un ordre 5. Quelque 5 km plus bas, à Nueva Concepción, il reçoit le Caño Sucio et donc un ordre 6 qu'il conserve jusqu'à l'embouchure. Il existe 7 autres *ríos* d'ordre 4 ou supérieur, respectivement nommés localement Riecito, Caño Sucio, Miguelito, Jobo, Congal, Caño del Iguanero et Caño Rey.

La pente moyenne du cours d'eau (0,5 %) est faible, surtout si l'on considère qu'elle est presque dérisoire en plaine (0,14 à 0,12 %). Il n'est donc pas étonnant que ce soit dans les derniers tronçons que les dégâts aient été les plus importants.

3 – L'ECET du 21 novembre 2006 : un talweg accompagné d'un front froid en combinaison avec une masse d'air chaud humide tropicale (*onda tropical*), et ses effets sur le bassin versant de Miguel de la Borda

L'estimation des conditions de la dynamique climatique régionale des Caraïbes (Pagney, 1966 ; Marshall *et al.*, 2001 ; Cámara *et al.*, 2005), nous permet d'identifier le développement de cinq grands types d'ECET : Ouragan, Tempête tropicale, Dépression tropicale, Perturbation associée à une masse d'air chaud et humide (*onda del Este et onda Oriental*) et Talweg avec front associé. Les trois premiers sont liés à la conjonction de trois facteurs :

- l'existence de températures chaudes (supérieures à 28 °C) à la surface de la mer ;
- un effet suffisant de la force de Coriolis laquelle commence à se faire bien sentir à partir des 10^{es} parallèles N et S ;
- et l'absence de flux d'air rapides en altitude de direction contraire à la dominante de surface, phénomène bien connu de « cisaillement du vent ». Pour la genèse, peut aussi intervenir l'adjonction depuis l'Est d'une masse d'air chaud et humide provenant de la *onda tropical* qui intensifie les phénomènes convectifs de la mer Caraïbe.

Pour sa part, le quatrième type d'ECET – la « Perturbation associée à une masse d'air chaud et humide » (ou *onda tropical*) – se caractérise par des pluies torrentielles accompagnées de tempêtes locales, d'un ou deux jours,

qui se manifestent spatialement par des inflexions des isobares vers le Nord, ce qui provoque un entassement de l'air sur le flanc oriental de ces dernières. Ceci les freine et les force à monter générant ainsi un refroidissement adiabatique favorable à la condensation. Ces *ondas* voyagent d'Est en Ouest, d'où leur appellation.

Enfin, le « Talweg avec front associé » se manifeste par une inflexion du courant pluvieux en altitude qui, sur le flanc oriental développe une zone de basse pression qui force le front subtropical à se bloquer. Il peut descendre en latitude vers la fin de l'automne et pendant l'hiver astronomique, en générant des advections d'air froid en domaine tropical, similaires à celles qu'on connaît sous les latitudes subtropicales. Ce phénomène engendre des précipitations localisées tout le long du front. Cependant, la combinaison d'un air froid dans les hautes et moyennes couches et d'un air chaud et humide en provenance de la surface de la mer Caraïbe, peut donner des précipitations diluviennes. Quelquefois ce front subtropical se combine avec une *onda tropical* qui apporte également un air chaud et humide. À ce moment-là les pluies peuvent atteindre de très grandes intensités sur quelques heures (jusqu'à 1 000 mm/24 h !). À titre de comparaison, ces intensités sont équivalentes à celles atteintes par les averses cycloniques et orographiques tropicales telles celles atteintes par les cyclones Denise (7/1/1966) ou Hyacinthe (15/1/1980) à l'île de la Réunion (parmi les records mondiaux, mais il est vrai sur 24 h).

Il s'est agi d'un ECET qui a été négligé par les systèmes d'alerte et de prévention de la Zone Caraïbe. Il est vrai que la rapidité de sa formation et de son déroulement (ou bien encore l'absence de données détaillées) explique cela. On comprend alors pourquoi il a été aussi catastrophique, au niveau local, que d'autres évènements (cyclones). L'évènement produit le 21 novembre 2006 dans la région caraïbe de Panama est un exemple d'école.

À partir du 19 novembre, la présence d'une importante advection froide avec front tropical en altitude fut détectée, s'approchant depuis le Costa Rica. Ce front se combina avec des masses d'air chaud et humide des basses couches atmosphériques (photo 3). La partie centrale de la République de Panama enregistra un maximum d'activité atmosphérique, avec des intensités de précipitations de plus de 700 mm en 24 h (et des vents supérieurs à 70 km/h), selon les données de la station de Los Hules (bassin du *río* Miguel de la Borda) de l'Autorité du Canal de Panama (ACP).

En ce qui concerne les dégâts, au niveau de l'ensemble de Panama, 264 maisons furent totalement détruites. Guásimo fut la localité qui enregistra des chiffres records, avec 48 habitations entièrement détruites. Quelques-unes furent abattues par un tronc de fromager qui sortit du lit majeur pour aller dans la plaine d'inondation (photos 4 et 5).

Photo 3. – Images de l'avancée du front de perturbation sur la côte orientale centre-américaine.

Photo 4. – Guásimo avant l'inondation (septembre, 2006).

Photo 5. – Guásimo après l'inondation (décembre, 2006).

Les précipitations intenses provoquées par cet ECET firent que le bassin du río Miguel de la Borda fut inondé dans des secteurs inhabituels. Guásimo, par sa situation hautement risquée en pleine plaine alluviale et à la confluence de deux cours d'eau importants, subit les dégâts les plus violents de l'inondation.

À chaque fois qu'on a affaire à un bassin versant non évalué et avec une plaine alluviale presque totalement mise en valeur, il convient de modéliser le phénomène sur le plan hydrologique pour avoir une idée exacte du processus et de ses effets. Les résultats sont fondamentaux pour établir un diagnostic de base, tout comme pour suggérer des mesures de gestion pour le bassin hydrographique.

4 – Modélisation de l'inondation consécutive à l'ECET dans le sous-bassin versant et *scenarii* de comportements hydrologiques

La modélisation du comportement hydrologique du río Miguel de la Borda dans le secteur de Guásimo a commencé avec la délimitation du sous-bassin versant hydrographique de cette localité qui comprend la confluence des ríos Miguel de la Borda et Congal. La superficie drainée couvre 430 km² soit 76 % du total du bassin versant (fig. 3). Il convient de souligner que ce sous-bassin versant a subi au cours de la dernière décennie un processus accéléré de déforestation ce qui permet d'élaborer différents *scenarii* de couverture végétale en rapport avec les réponses hydrologiques.

Aux fins de modélisation hydrologique de l'ECET du 21 novembre 2006, on a utilisé l'application HEC-HMS (logiciel HEC-HMS : *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*), système de modélisation hydrologique. On a divisé l'aire de drainage en suivant les indications du Pole SCS (Solutions Communicantes Sécurisées) (1972). La mesure des propriétés géométriques du sous-bassin versant, requises pour l'application, s'est faite grâce à l'outil auxiliaire (*software package*) HEC-GeoHMS (*Geospatial Hydrologic Modeling Extension*), une extension qui travaille dans le système ArcView.

Pour obtenir des superficies de précipitations, des modèles de corrélation multivariante ont été construits, mettant en relation la précipitation enregistrée dans les pluviomètres que gère l'ACP (fig. 4) et les variables de distance (en coordonnées x et y) et de hauteur.

Les équations résultantes ont été évaluées sur le terrain en utilisant l'algèbre cartographique (système Arc View) et en substituant les valeurs de ces variables dans 8 équations, chacune étant corrélative de la précipitation accumulée par intervalles de 3 heures. Les résultats obtenus sont les valeurs de précipitation pour chaque cellule de 1 000 x 1 000 m du milieu étudié, dont l'expression cartographique est consignée dans la figure 5.

Figure 4. – Bassin versant du río Miguel de la Borda avec indication du sous-bassin qui draine la localité de Guásimo (en hachures verticales grises), d'une superficie de 430 km².

Figure 6. – Modèles de précipitations, selon des intervalles réguliers de 3 heures, pour estimer la précipitation tombée sur le bassin versant du río Miguel de la Borda, le 21 novembre 2006. La séquence débute dans la cellule supérieure gauche en suivant vers le bas de la même colonne jusqu'à la cellule inférieure. Puis elle continue dans la cellule supérieure et se termine dans la cellule droite inférieure. Les équations sont le résultat de la régression polynomiale multivariante d'ordre 1. Le r^2 , en général, est supérieur à 0,9.

Dans la séquence cartographique de la figure 6, on constate que la précipitation sur le bassin versant est variable en fonction de chaque intervalle de 3 heures. Deux de ces derniers accumulèrent des précipitations maximales moyennes sur le bassin versant, de 03 à 06 heures et de 09 à 12 heures, avec des totaux respectifs de 105 et 106 mm. Dans de tels intervalles, l’activité frontogénique a été maximale ; la mer Caraïbe produisait un air très humide et le front entrant par l’Ouest, de la façon dont cela est consigné dans le carton 2 de la figure 6.

Intervalle	Précipitations moyennes (en mm)
De 00 a 03 heures	8
De 03 a 06 heures	105
De 06 a 09 heures	96
De 09 a 12 heures	106
De 12 a 15 heures	59
De 15 a 18 heures	71
De 18 a 21 heures	32
De 21 a 24 heures	8

Tableau 4. – Moyenne de précipitations tombées sur le terrain considéré selon des intervalles de 3 heures le 21 novembre 2006.

Figure 7. – Moyenne de précipitations tombées sur le bassin versant du rio Miguel de la Borda (sous bassin jusqu’à Guásimo), le 21 novembre 2006. Deux pointes se détachent dans les intervalles de 03 à 06 heures et de 09 à 12 heures.

Cette méthode prévisionnelle de précipitations pour des secteurs sans pluviomètre est de plus grande précision que celle des modèles d'interpolation linéaire, ou ceux de l'inverse de la distance élevée à une puissance.

La modélisation, à partir d'une interpolation de l'inverse de la distance au cube (fig. 6), suppose une approximation très résumée qui ne prend pas en compte les différences de pluviométrie provoquées par des variables comme le relief ou les variations latérales du phénomène.

Figure 8. – Précipitation maximale en 24 heures, le 21 novembre 2006, d'après l'interpolation de l'inverse de la distance au cube.

En définitive, l'utilisation de données précises permet de modéliser avec une grande précision les débits accumulés dans le bassin versant si bien qu'on a adopté l'utilisation des valeurs estimées par modèle de régression multivariante.

Avec les valeurs de précipitation et les propriétés géométriques des 66 sous-bassins versants qui couvrent la région étudiée, on construit un modèle de bassins versants en HMS pour bâtir un hydrogramme de crue selon la méthode du SCS.

Deux scénarios ont été construits :

* E-1 : avec une situation optimale avec plus de 80 % de la surface recouverte de forêts ce qui était l'état du bassin versant dans la décennie des années 1980 ;

* E-2 : avec la situation actuelle, n'ayant plus que 20 % de forêts, et qui traduit une situation préoccupante quant à la dégradation du sous-bassin versant et la gestion des risques émanant des crues.

Figure 9 – Hydrogramme de crue du río Miguel de la Borda à Guásimo pour deux scénarios de couvertures végétales distinctes. La ligne rouge correspond au scénario actuel (18 % à 20 % de forêt), tandis que la verte souligne une situation idéale de conservation, avec plus de 80 % de forêt (situation qui était celle du bassin versant dans les années 1980). Le débit dans le scénario actuel a été de 3 405 m³/s, soit 850 m³/s de plus que ce qu'on aurait enregistré dans le scénario précédent. Noter également que le pic de crue se serait produit une heure plus tard avec le scénario optimal de conservation de la couverture végétale.

Les résultats des débits résultant des scénarios E-1 et E-2 sont synthétisés dans la figure 8. Si cet évènement hydrométéorologique extrême s'était produit dans les années 1980, le débit aurait été de 2 555 m³/s, soit 850 m³/s de moins que ce qu'il fut lors de la crue de novembre 2006, uniquement du fait de la rétention par les masses forestières, la couverture pédologique et le manteau d'altération fixé par la couverture végétale.

Quant au niveau de la lame d'eau de l'onde de crue, celui-ci aurait été de 3 m moins élevé dans la plaine alluviale au niveau de Guásimo, et avec une moindre force hydraulique. En conséquence les dégâts matériels auraient été probablement moins importants.

Quelques recommandations pour la gestion intégrée des bassins versants en pays tropicaux

Les ECET sont une manifestation climatique propre au domaine tropical et constituent l'un des principaux paramètres à prendre en compte en matière de gestion intégrée des bassins hydrographiques, qu'ils soient ou non régulés par le biais d'infrastructures hydrauliques.

Le cas de l'ECET du 21 novembre 2006, de type « Talweg » en combinaison avec une « *Onda Tropical* » survenu à Panama a eu une forte répercussion sur le bassin versant, non régulé, du *río* Miguel de la Borda. Son étude a permis d'apporter des enseignements nouveaux quant à la gestion des bassins versants, le principal étant la mise en valeur de l'importance de la modélisation hydrologique de ces évènements fortement convectifs. Ensuite, il est possible d'analyser leurs conséquences sur les bassins versants ou sous bassins versants, et cela à l'échelle du détail ou du semi-détail.

Une évaluation hydrologique suivie permettrait tout d'abord une confrontation (et une réévaluation au besoin) avec les scénarios globaux du changement climatique du GIEC (et de voir les répercussions pour la Més-Amérique) élaborés avec de grandes approximations spatiales. Ensuite, le rôle de l'importance du maintien de la couverture végétale en tant que « facteur régulateur » de crue est confirmé. En fonction de cela il est possible de développer trois types d'actions intégrées :

- 1 – élaborer des systèmes d'alerte et de prévention pour réduire la vulnérabilité des populations ;
- 2 – proposer de nouvelles orientations de conservation de la nature fondées sur la protection de la forêt en tant qu'aires de régulation hydrique ;
- 3 – mettre en place une gestion adaptée aux principes d'incertitude par rapport aux systèmes naturels fluctuants.

La modélisation et les scénarios du cas de Guásimo expriment de façon frappante l'importance de la couverture végétale comme facteur régulateur (Pomel et Salomon, 1998). Dans les années 1980 plus de 80 % du bassin versant étaient recouverts d'une forêt pratiquement intacte. Mais en 1986, l'écosystème forestier ne protégeait plus que la moitié du bassin hydrographique du *río* Miguel de la Borda. Les masses forestières se situaient dans la moitié occidentale du bassin versant. De nos jours il ne reste plus que quelque 18 % de forêt et si la tendance à la déforestation persiste durant quelques décennies, les terrains de parcours envahiront tout. Enfin, lors de la décennie des années 1980, la forêt-galerie était bien conservée, ce qui empêchait le

passage des troncs flottants vers la plaine alluviale et réduisait de beaucoup les dégâts dévastateurs par arrachement et coups de boutoir, et bien sûr l'instabilité géomorphologique des marges riveraines.

Remerciements

À l'Autoridad Nacional el Ambiente (ANAM) et particulièrement aux *Direcciones Nacionales de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas y de Fomento de la Cultura Ambiental*, à Sinaproc et à l'ACP.

Ce travail est une contribution au *Proyecto Integral para el Desarrollo de la Costa Abajo de Colón (PIDCAC) (Fondo Mixto Hispano-Panameño de Cooperación)* et concrètement aux *Directrices de Ordenación para la Gestión Integrada de las Cuencas Hidrográficas de los ríos Indio y Miguel de la Borda (provincia Colón, República de Panamá) (2006-2008)*.

De même, les auteurs remercient le *Proyecto de Ayuda a la Investigación Internacional (OTRI/US-CICT, 2002-2004) « Sistema Ecodinámico para la Evaluación y Gestión del Medio Natural Tropical : Transferencia de Resultados de Investigación Aplicada a la Conservación de los Recursos Naturales »* pour les appuis qu'il leur a prodigués. Ils remercient également F. Pagney pour sa relecture minutieuse.

Bibliographie

- BENISTON M. et GOYETTE S., 2007 – Editorial. *Global and Planetary Change*, n° 57, p. vii.
- BENISTON M. et SEPHENSON D.B., 2004 – Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, vol. 44, p. 1-9.
- CÁMARA R., MARTÍNEZ BATLLE J.R. et DÍAZ del OLMO F., 2005 – *Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente en República Dominicana. Medios naturales, manejo histórico, conservación y protección*. Madrid-Sevilla : CSIC-Universidad de Sevilla, 280 p. (Coll. Americana 25)
- DEMANGEOT J., 1999 – *Tropicalité. Géographie physique intertropicale*. Paris : Armand Colin, U Géographie, 340 p.
- MARCHALL J., KUSHNIR Y., BATTISTID., CHANG P., CZAJA A., DICKSON R., HURELL J., McCATNEY M., SARAVANAN R. et VISBECK M., 2001 – North Atlantic Climate Variability : Phenomena, Impacts and Mechanisms. *International Journal of Climatology*, vol. 21, p. 1863-1898.
- PAGNEY P., 1966 – *Climat des Antilles*. Paris : Institut des Hautes Études de l'Amérique Latine, Travaux et Mémoires, 500 p.
- POMEL S. et SALOMON J.-N., 1998 – *La déforestation des pays tropicaux*. Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux, collection Scieteren, 160 p., 8 fig., 3 tab., 12 photos.

- SALOMON J.-N., 1997 – *L'homme face aux crues et aux inondations*. Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux, collection Scieteren, 136 p.
- SALOMON J.-N., 1997 – 2006 : Autopsie d'une catastrophe annoncée : Katrina et la Nouvelle-Orléans. *Bulletin des Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée*, UFR de Géographie, Bordeaux, n° 2, p. 59-69, 3 fig., 5 tab.
- Soil Conservation Service, SCS, 1972 – *National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service.

Résumé

Depuis plus de deux décennies l'attention a été attirée sur les Caraïbes et l'Amérique centrale en raison des cyclones qui affectent cette région de la planète. Cependant, il existe aussi d'autres mécanismes climatiques qui conduisent à la genèse d'évènements extrêmes, très dévastateurs. Cet article se propose d'étudier l'un de ces derniers, survenu sur le bassin versant du *Río Borda* (Panama), et d'en tirer les multiples enseignements qui pourraient conduire à élaborer à l'avenir une politique de prévention. En particulier, la mise au point d'une modélisation hydrologique apparaît comme une avancée décisive pour mettre en place une gestion pertinente destinée à réduire la vulnérabilité des populations.

MOTS-CLÉS : Amérique Centrale, Panama, Évènements extrêmes tropicaux, Bassin versant, Modélisation hydrologique HEC-HMS.

Resumen

El evento climático extremo tropical (ECET) del 21 de noviembre de 2006: análisis hidro-geomorfológico y gestión integrada de las cuencas hidrográficas tropicales

Los últimos veinte años la atención se ha centrado en el Caribe y América Central a causa de los ciclones que afectan esta región del planeta. Sin embargo existen otros mecanismos climáticos que conducen a la génesis de Eventos Extremos muy devastadores. En este artículo se propone el estudio de uno de estos Eventos, el ocurrido en la cuenca hidrográfica del río Miguel de la Borda (Panamá), del que se pueden obtener múltiples enseñanzas conducentes a elaborar para el futuro políticas de prevención de riesgos. De forma particular, la elaboración de una modelización hidrológica se muestra como uno de los avances decisivos para desarrollar una gestión adecuada y adaptable destinada a reducir la vulnerabilidad de las poblaciones locales.

PALABRAS-CLAVES: América Central, Panamá, Eventos Extremos Tropicales, Cuenca Hidrográfica, Modelización hidrológica HEC-HMS.

Abstract

The extrem climatic tropical event (ECTE) of the 21th november 2006 : hydro-geomorphological analysis and integrated managment of tropical watersheds

During the last twenty years, the international community has paid attention to Caribbean and Central America due to hurricanes that affect this region. However, there are other climatic phenomena that generate devastating Extreme Events, such as tropical waves associated to cold fronts. This paper studies one of these Tropical Extreme Events, the event that occurred in the Miguel de la Borda watershed (Panama), from which some experiences and lessons could be extracted leading to a natural risks prevention policy. Specifically, a hydrological modelization is one of the main contributions to develop an improved and adaptive management intending to reduce vulnerability of local populations.

KEYWORDS: *Central America, Panama, Tropical Extreme Events, Watershed, Hydrological modelization HEC-HMS.*