

# RÉSOLUTION ET PRÉCISION DES OUTILS NUMÉRIQUES (MNT ET IMAGE SATELLITE) NÉCESSAIRES À LA DÉLIMITATION DE BASSINS VERSANTS EN RÉGION TROPICALE

Frédérique SEYLER\*, Frédéric MULLER\*, Gérard COCHONNEAU\*, Jean Loup GUYOT\*\*

\*IRD Brasilia /UnB (Université de Brasilia)/ANEEL(Agencia National Energia Electrica  
C.P. 7091 71619-970 BRASILIA D.F. BRÉSIL 00556199793387 fseyler@unb.br

\*\* IRD Toulouse

## Résumé

Dans une perspective de modélisation hydrologique spatialisée du bassin amazonien, quelques méthodes employées pour l'extraction automatique des bassins de drainage, les sources de données disponibles (MNT, images de télédétection, cartes numérisées), leur précision et leur qualité, ont été testées. Les résultats obtenus pour le bassin du Rio Negro, affluent de l'Amazone, permettent de déterminer quelles sont les données dont la qualité et la précision suffisent pour la modélisation.

Les données utilisées ont été le MNT 30 arc-secondes de l'USGS (GTOPO30), le réseau hydrographique du Digital Chart of the World, un réseau hydrographique extrait d'une mosaïque d'images JERS, et un réseau hydrographique numérisé à partir des cartes au 1:1000000 de la série "International Map of the World". La qualité spatiale et verticale des données est discutée. Malgré la faible résolution des données utilisées, la méthodologie définie a donné de bons résultats pour l'extraction des bassins versants, montrant ainsi que la précision du MNT à maille d'un kilomètre est suffisante pour une application de modélisation dans le bassin amazonien, compte tenu du nombre et de la localisation des stations hydrométriques disponibles.

**Mots-clés** : Délimitation de bassins versants, MNT, réseau de drainage, images ROS, modélisation hydrologique, Basin Amazonien, Rio Negro

## Abstract

Aiming at the distributed hydrological modeling of the Amazon basin, some methods used for the automatic extraction of watersheds, the available data (DTM, remote sensing images, digitalized maps, their precision and quality, have been tested. The results obtained for the Rio Negro sub-basin, allow the determination of data quality and precision needed for the modeling.

The data used have been DEM GTPO30 (USGS), the drainage network of the Digital chart of the world (DCW), a drainage network digitalized from a JERS-1 mosaic, and a drainage network digitalized from 1:1 000 000-scale maps of the serie "International Map of the World" (IMW). The spatial and vertical quality of the data is discussed. Although the resolution of the data used is coarse (1km grid cell for the MNT), the methodology that has been defined gave good results for the watershed extraction. This shows that the DEM precision is sufficient for the modeling purpose of our study, given the number and localization of the gauge stations that are available to run the model.

**Key words:** Watershed delineation, DEM, drainage network, SAR images, hydrologic modelling, Amazon basin, Rio Negro

## 1. INTRODUCTION

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme franco-brésilien HiBAm (Hidrologia da Bacia Amazonica) réalisé en partenariat entre l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement, France), l'ANEEL (Agencia Nacional Energia Electrica, Brésil) et l'UnB (Université de Brasilia, Brésil). L'objectif général de ce programme est la modélisation hydrologique distribuée du bassin Amazonien. La méthode choisie pour la modélisation de l'ensemble du bassin est le couplage d'un SIG (Système d'Informations Géographiques) constitué grâce aux logiciels Arc View et Erdas Imagine et des modèles HEC-HMS 1.0 et HEC-RAS 1.0. Le logiciel CRWR-PrePro (Maidment *et al.*, 1997) de l'Université du Texas, Austin, a été défini pour faire le lien entre le SIG et le modèle hydrologique. Ce logiciel définit pour le bassin les chemins hydrauliques et leurs caractéristiques à partir d'un MNT (modèle Numérique de Terrain) en utilisant la méthode D8 (O'Callaghan et Mark, 1984), qui détermine la direction d'écoulement pour chaque cellule du MNT en examinant l'altitude de ses huit

voisins. Le seul MNT actuellement disponible pour le bassin Amazonien est le GTOPO30 de l'USGS (United States Geological Service), dont la taille de la cellule de résolution est d'environ 1km. Pour améliorer la qualité de l'extraction des sous-bassins, le MNT est préalablement sur-creusé sur le tracé des rivières. Le réseau de drainage utilisé pour ce sur-creusement est un réseau obtenu par digitalisation d'une mosaïque d'images JERS-1 qui couvre la totalité du bassin Amazonien (Seyler *et al.*, soumis). La principale question à laquelle il sera répondu dans ce travail est la suivante: Le MNT GTOPO30 couplé au réseau issu des images JERS a-t-il une résolution et une précision suffisante pour permettre de réaliser l'objectif de modélisation hydrologique distribuée du bassin Amazonien? Nous examinerons la qualité et la précision du MNT, et celle du réseau JERS. Pour répondre à la question posée, il sera fait une analyse de la qualité de l'extraction des sous-bassins correspondant aux stations de jaugeage qui vont permettre de valider la modélisation. Cette analyse sera effectuée dans une zone test, le sous bassin du Rio Negro.

## 2. MATERIELS ET MÉTHODES

### 2.1 Présentation du sous-bassin du Rio Negro

Le Rio Negro rejoint le Rio Solimoes pour former l'Amazone. Son bassin versant a une superficie d'environ 700 000 km<sup>2</sup> et est situé entre -3° et +5° en latitude et entre -58° et -73° en longitude. La géologie du bassin est caractérisée par des formations du précambrien à l'archéen pour les parties situées sur le bouclier Guyanais (environ 50% de la superficie du bassin) et par des formations sédimentaires plus récentes (secondaires, tertiaires et quaternaires). La végétation est composée de savanes plus ou moins arborées (région du Roraima) et en majeure partie de forêt dense ombrophile. Les sols sont des latosols et des podzols. Dans l'ensemble le modelé est aplani avec quelques reliefs à l'est (Andes) et au Nord. Le bassin du Rio Negro est, par ses caractéristiques physiques, représentatif de l'ensemble du bassin Amazonien, aussi bien pour la topographie, la géologie, les sols et la végétation que pour la climatologie. En effet d'importantes variations de pluviométrie sont enregistrées au niveau de ce sous-bassin (entre 500 et 5000 mm de pluie totale annuelle par exemple sur l'année 1976) et le régime hydrique de ses deux principales rivières est contrasté (régime équatorial pour le Rio Negro, régime tropical boreal pour le Rio Branco).

## 2.2 Méthode employée pour préparer la modélisation hydrologique.

Le logiciel CRWR-PrePro qui prépare les données du SIG en vue de l'utilisation de paramètres distribués dans la modélisation hydrologique (telle que réalisée dans les modules HEC-HMS et HEC-RAS) a une partie essentielle qui concerne l'extraction du tracé

des cours d'eau et la délimitation de leurs bassins versants. L'individualisation d'un cours d'eau se fait suivant la procédure suivante: Pour chaque cellule de la grille du MNT, l'altitude de ses huit voisins est examinée, et le sens d'écoulement de l'eau d'une cellule se fait vers la cellule voisine de plus basse altitude. La procédure considère qu'il n'y a qu'un seul exutoire au bassin, et que si pour une cellule qui n'est pas l'exutoire, aucun des huit voisins n'a une altitude inférieure, il s'agit d'un artefact du MNT qui doit être corrigé par le remplissage de ces "puits". Un cours d'eau est individualisé (source du cours d'eau ou première cellule située à l'amont de ce cours d'eau) quand un certain nombre de cellules s'accumulent en direction de cette cellule source. Le choix du nombre de cellules accumulées ou "seuil d'accumulation" est un paramètre essentiel dans la densité du réseau extrait par la procédure. Pour ce travail le seuil d'accumulation a été choisi de 1000 cellules, ce qui correspond à des bassins versants "élémentaires" d'une superficie d'environ 850km<sup>2</sup>, taille qui correspond à la taille des plus petits bassins jaugés par les réseaux nationaux qui vont nous servir à valider le modèle hydrologique. La définition des tracés et la délimitation des bassins, si elle est effectuée à partir du *seul* MNT, montre un certain nombre d'artefacts et d'erreurs (Seyler *et al.*, 1999, Seyler *et al.*, soumis) qui sont pour les premiers bien connus (Gupta *et al.*, 1980, Tarboton *et al.*, 1991, Riazanoff *et al.*, 1992) et imputables à la méthode des huit voisins (tracés parallèles dans les zones planes), et pour les secondes

résultent de la faible résolution et d'erreurs du MNT. La méthode la plus couramment employée pour corriger à la fois les artefacts et les erreurs, est le sur-creusement du MNT par un réseau hydrographique pré-existant. Nous avons montré (Seyler *et al.*, 1999, Seyler *et al.*, soumis) que la qualité du réseau détermine la qualité du résultat obtenu. Le résultat obtenu se compose de deux parties: 1- l'individualisation des cours d'eau à partir du MNT comme décrit précédemment; ces cours d'eau extraits du MNT sont indispensables à la suite de la modélisation parce qu'ils sont spatialement compatibles avec les altitudes environnantes (c'est la raison pour laquelle un réseau pré-existant ne peut pas être employé en lieu et place des cours d'eau extrait du MNT), et 2 – la délimitation des bassins versants. C'est la qualité de ces deux résultats qui va servir

d'estimateur pour répondre à la question posée dans ce travail.

## 2.3 Données utilisées

### 2.3.1 MNT GTOPO30

Le MNT de l'USGS GTOPO30 est une grille régulière dont les cellules ont une taille de 30 arc-secondes (soit environ 0,00833 degrés). Le système de coordonnées horizontales utilisé est celui des coordonnées géographiques en degrés décimaux référencées à l'ellipsoïde WGS84. La figure 1 présente les sources cartographiques utilisées pour la confection de ce MNT dans les limites du bassin hydrographique de l'Amazonie. Les différentes sources de 1 à 5 ainsi que leurs caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 1.

Vertical accuracy (meters)			
Source	L.E. at 90%	RMSE	Estimation method
-----	-----	-----	-----
1 DTED	30	18	product specification
2 DCW	160	97	calculated vs. DTED
3 AMS maps	250	152	estimated from 500-meter interval
4 IMW maps	50	32	estimated from 100-meter interval
5 Peru map	500	304	estimated from 1,000-meter interval

tableau 1 (d'après spécifications du MNT (USGS))

La majeure partie du bassin amazonien est couvert par la source IMW (International Map of the World). La taille des cellules de la grille en degré

décimaux varie avec la latitude. Pour la région du Rio Negro la taille de la grille varie de 921 à 922m dans la direction Nord/Sud et de 928 à 914m d'Est en Ouest.

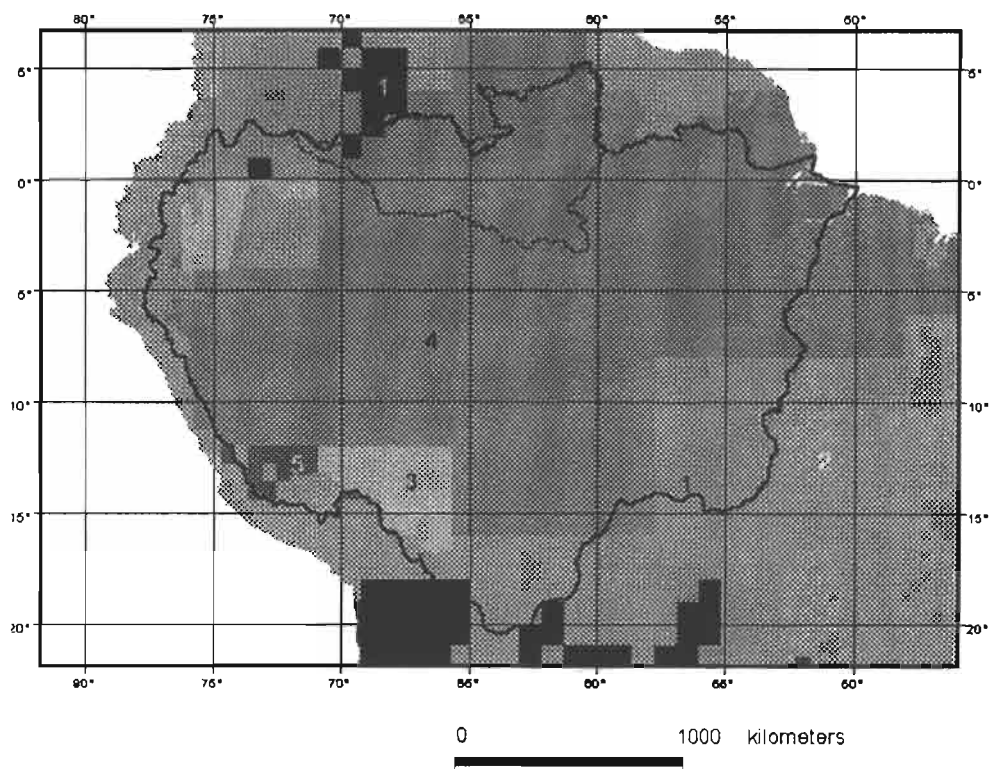


Figure 1: Sources cartographiques du MNT. Les numéros de 1 à 5 sont détaillés dans le tableau 1. Le trait noir gras est la limite du bassin amazonien. Le trait noir fin est la limite du sous-bassin du Rio Negro.

### 2.3.2. Réseau hydrographique digitalisé à partir d'une mosaïque d'images JERS-1

Le réseau hydrographique utilisé pour sur-croiser le MNT est un réseau digitalisé à partir d'une mosaïque d'images radar du satellite JERS-1 (NASDA, National Space Development Agency of Japon). La digitalisation a été une procédure semi-automatique, c'est à dire automatique pour les cours d'eau principaux et manuelle pour les petits cours d'eau, ce qui a représenté la plus grande part du travail réalisé. La procédure employée a été décrite dans Muller *et al.*, 1999, et Seyler *et. al.*, soumis. Les données ROS du satellite japonais sont en bande L. La mosaïque d'images qui couvre la totalité du bassin amazonien (à l'exception d'une petite partie du bassin situé en Bolivie) a été réalisée par le projet GRFM (Global Rain

Frédérique Seyler

Forest Mapping Project, projet mené par la NASDA en coopération avec la NASA et diverses institutions américaines, européennes et brésiliennes) par sous-échantillonnage des images sources, référencée en coordonnées géographiques (degrés décimaux) à l'ellipsoïde WGS84. La résolution de la mosaïque est de 3 arc-secondes, soit variable de 89 à 93m selon la latitude. La précision de la localisation géographique de la mosaïque a été estimée par le projet GRFM (Chapman B. *et al.*, 1996). Cette estimation est basée sur 45 points de contrôle répartis dans tous les bassins, qui ont pu être repérés sur la mosaïque et sur des cartes à l'échelle du 1:100 000 du Pérou et du Brésil. L'analyse des erreurs de localisation a montré une relation linéaire des erreurs en longitude en

fonction de la longitude (figure 2), ainsi qu'une plus

NASDA-map longitude difference vs. longitude

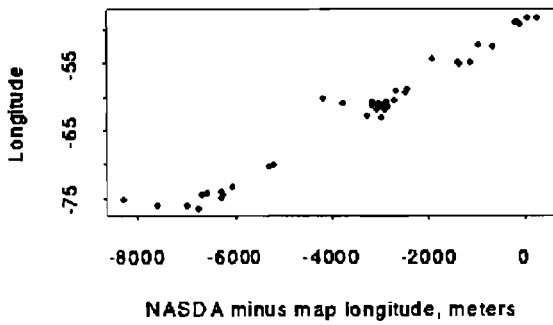


Figure 2: Relations des erreurs de localisation en longitude (en m) par rapport à la longitude d'après Chapman *et al.*, 1996.

faible relation des erreurs en latitude avec la longitude. Pas de relation de la variation des erreurs de localisation avec la latitude n'a été mise en évidence sur ce jeu de points de contrôle. Un réajustement de la mosaïque a donc été effectué et les erreurs après réajustement sont représentés figure 3 et tableau 2.

Error	NASDA lon	NASDA lat
<= 100 m	2%	16%
<= 500 m	27%	56%
<= 1000 m	44%	87%
<= 2000 m	51%	96%
<= 5000 m	100%	100%

### Differences between adjusted NASDA mosaic and map

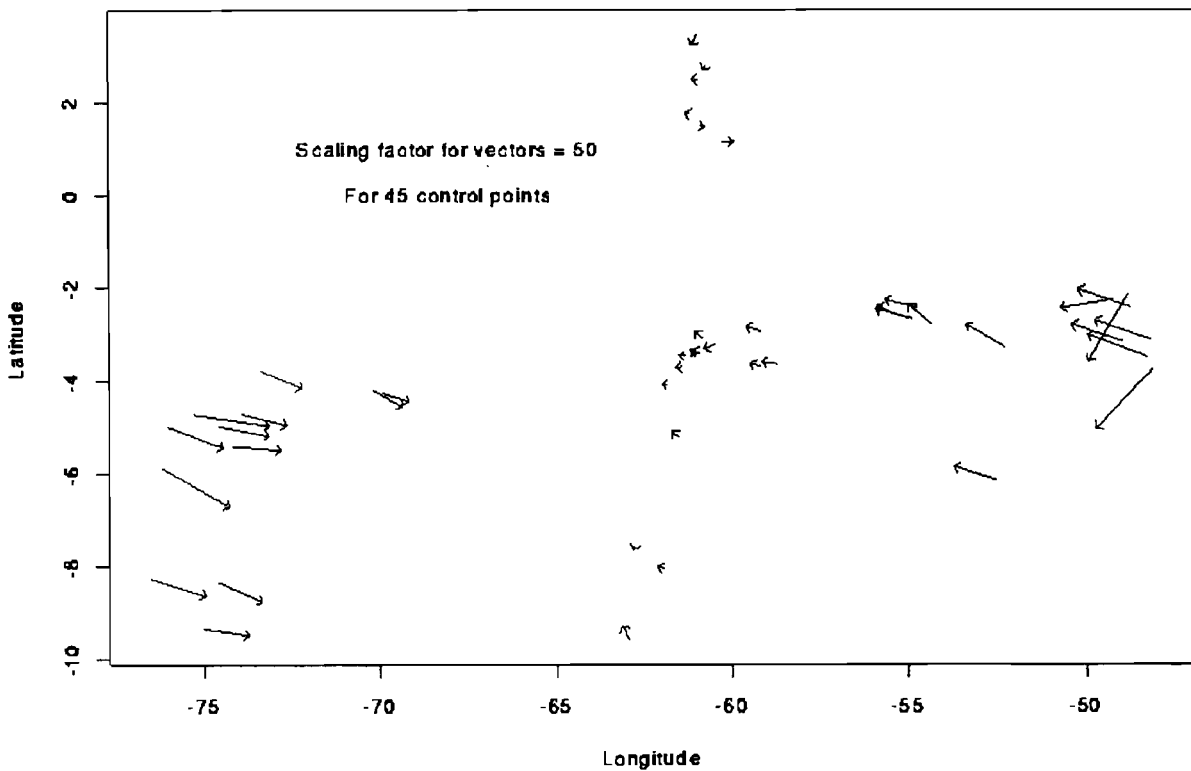


Tableau 2 (d'après Chapman *et al.*, 1996)

Figure 3: Vecteurs des erreurs de localisation (en degrés décimaux avec un facteur de grossissement de 50) localisés en longitude et en latitude. D'après Chapman *et al.*, 1996.

### 2.3.3. Réseau des stations de jaugeage en format vecteur

Ont été retenues dans cette étude 250 stations de jaugeage des réseaux de mesures hydrographiques nationaux du bassin amazonien (ANEEL – Agencia Nacional de Energia Eletrica, Brésil; SENAHMI – Servicio nacional de Meteorologia e hidrologia, Bolivie; et INAMHI – Instituto Nacional de meteorologia e hidrologia, Equateur). Les stations de jaugeage ont été repérées par GPS au cours de diverses campagnes de terrain et par des opérateurs divers ou directement à partir de cartes à l'échelle du 1:1 000 000. Pour l'extraction des bassins versants, elles ont été repositionnées manuellement sur les cours d'eau du réseau JERS sous la supervision des opérateurs des réseaux et des chercheurs connaissant le terrain (par exemple, quand il était nécessaire de s'assurer si une station était en amont ou en aval d'une confluence).

### 2.4. Estimation de la précision des sources et de la qualité des résultats

Actuellement, nous ne disposons pas de données altimétriques suffisantes nous permettant de tester les erreurs du MNT. Quelques stations sont en cours de raccordement au réseau géodésique du Brésil, ces raccordements fourniront d'ici peu un calage absolu des stations concernées et permettront de caler relativement le MNT, mais les erreurs sur l'ensemble du bassin ne pourront pas être testées. La précision du MNT a donc été estimée d'après les données fournies par l'USGS, pour notre zone d'étude. La qualité du MNT a ensuite été estimée en fonction de nos objectifs de modélisation, par 1) l'estimation de l'adéquation des

cours d'eau extraits du MNT avec le réseau digitalisé sur JERS-1 (identification d'éventuelles diffuences) et 2) de la qualité de la définition de l'écoulement de l'eau dans le bassin du Rio Negro.

La précision géographique de la mosaïque d'images JERS a été testée de deux façons différentes: Tout d'abord la différence de positionnement des stations avant et après correction manuelle pour les repositionner sur les cours d'eau a été calculée pour 120 stations réparties dans l'ensemble du bassin amazonien. Ensuite 44 points de contrôle pour le sous-bassin du Rio Negro ont été relevés entre le réseau hydrographique digitalisé (d'après la mosaïque JERS-1) et un réseau hydrographique digitalisé à partir de cartes au 1:1 000 000 de la série IMW. Les erreurs mises en évidence par ces deux méthodes ont été comparées avec les erreurs de localisation rapportées par le projet GRFM.

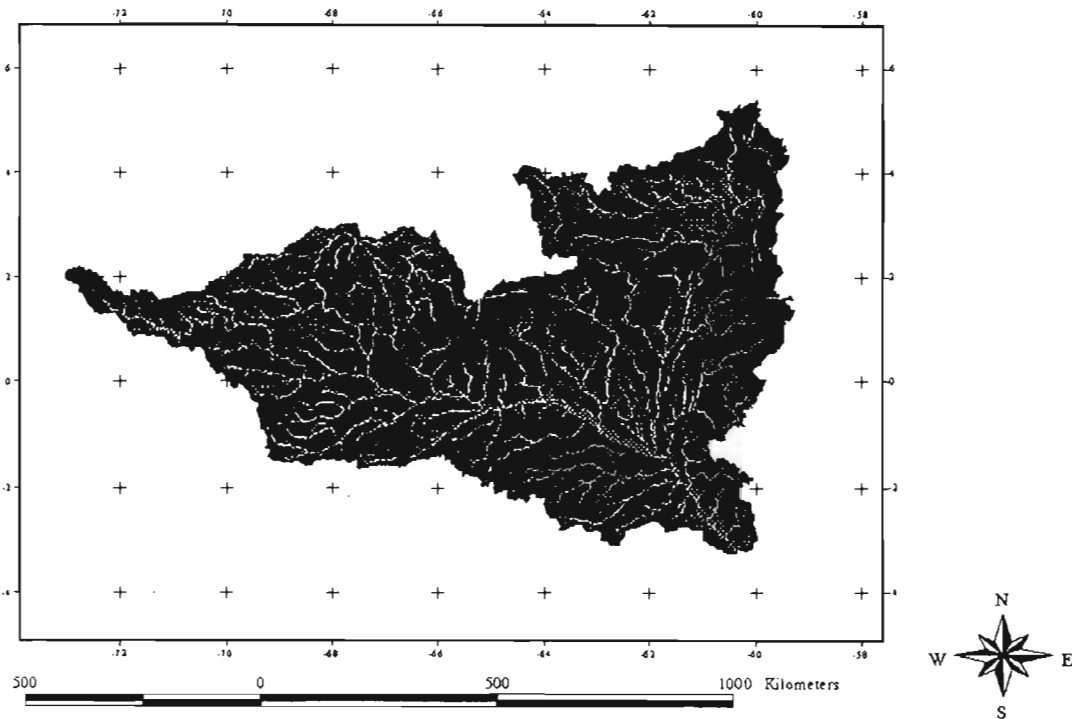
En définitive, la qualité et la précision des données utilisées a été estimée par rapport aux objectifs de modélisation spatialisée de l'ensemble du bassin par le pourcentage des superficies des sous-bassins du Rio Negro extraits par la procédure automatique par rapport à la superficie obtenue par délimitation manuelle sur des cartes au 1:1 000 000.

## 3. RÉSULTATS

### 3.1. Précision altimétrique

Si on localise géographiquement l'ensemble des stations par rapport aux sources du MNT (figure 1), il apparaît que 66,4% des stations sont situées dans une zone issue des cartes de la série IMW, soit d'une précision altimétrique estimée à 50m. Pour les zones planes en particulier, cette précision paraît

procédure automatique et le réseau pré-existant (figure 4), ainsi que la définition satisfaisante du chemin hydraulique pour le bassin du Rio Negro (figure 5). Il semble donc que le sur-creusement du MNT par le réseau JERS corrige les erreurs du MNT et fournissent une précision relative suffisante pour nos objectifs de



extrêmement faible. Cependant, on constate une bonne adéquation entre les cours d'eau extraits par la

modélisation.

Figure 4 (au dessus): Superposition des cours d'eau extraits automatiquement (en blanc) sur le réseau hydrographique digitalisé d'après JERS (en gris moyen).

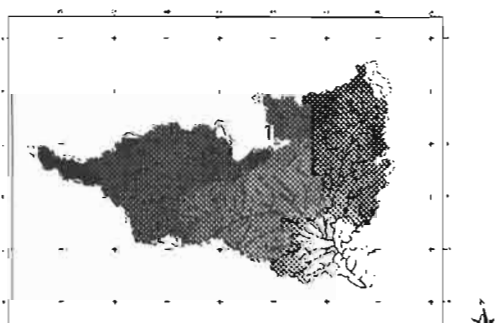
Figure5 (à côté): Equidistance de la longueur hydraulique du noir (le chemin le plus long) au blanc (le chemin le plus court)

La première estimation des erreurs horizontales, qui a consisté à comparer les positions

### 3.2. Précision géographique

des stations avant et après correction manuelle pour

les replacer sur le réseau digitalisé, a donné des



résultats absolus moins bons que ceux fournis par le projet GRFM. Seulement 59% des stations sont positionnées avec moins de 1200m d'erreur linéaire en longitude, et seulement 49% des stations sont positionnées avec moins de 700m d'écart en latitude. Cependant, le positionnement des stations au GPS ou

sur des cartes au 1:1 000 000 est peut être elle-même entachée d'erreur. Par contre, ces résultats sont intéressants dans la mesure où ils nous fournissent une confirmation, voire une amélioration de l'estimation des relations des erreurs de localisation en fonction de la longitude et de la latitude. La figure 6 présente ces relations.

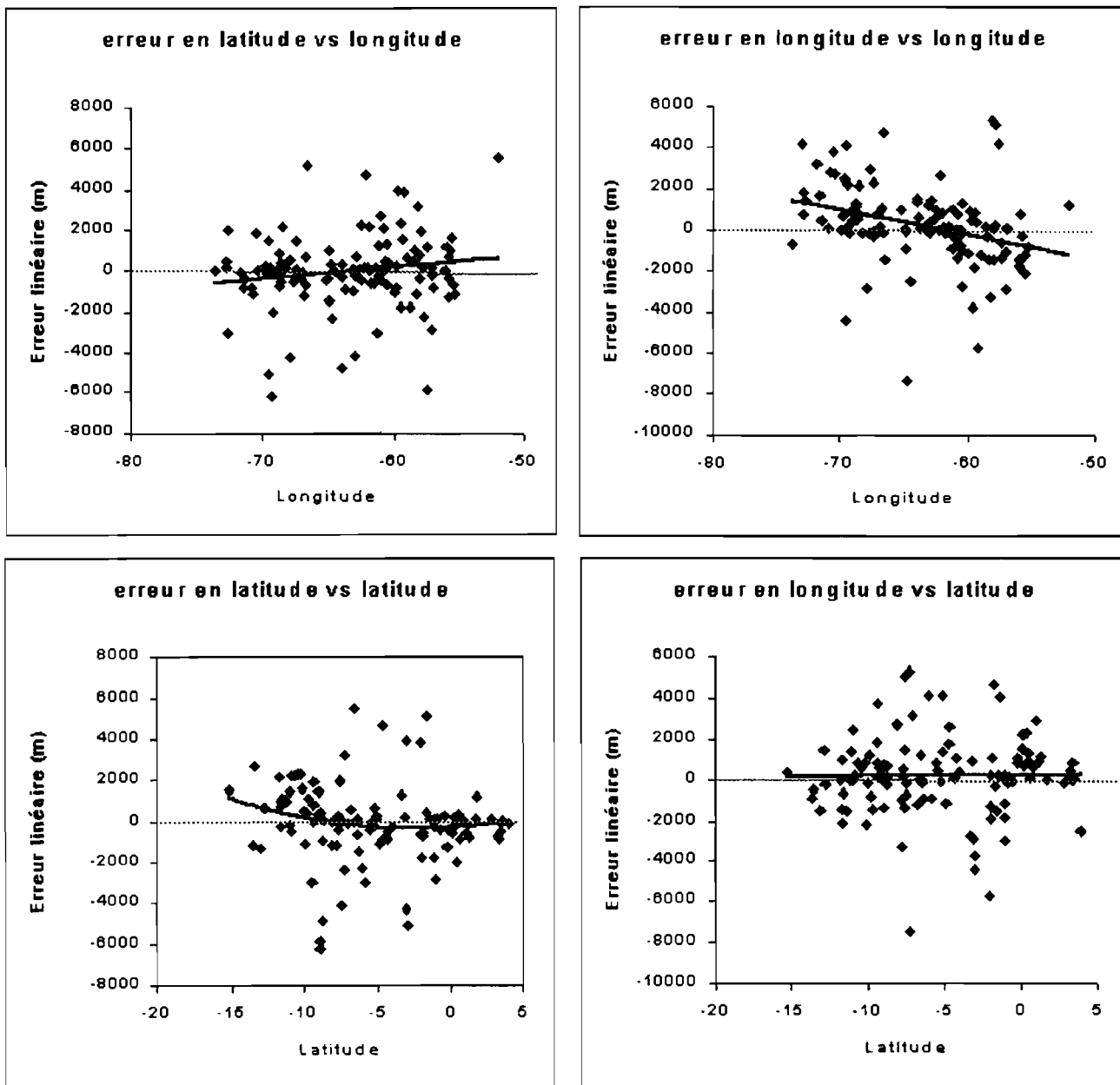


Figure 6: Variation des erreurs en fonction de la longitude et de la latitude

Les erreurs varient essentiellement avec la longitude, comme cela a été montré par le projet

GRFM; les erreurs sont minimum entre 60 et 65° et augmentent vers l'est et l'ouest. Notre vérification basée sur le positionnement des stations montre la

même tendance pour la longitude et la latitude. La variation des erreurs avec la latitude est moins nette. Il semble exister une tendance polynomiale de la variation des erreurs en latitude en fonction de la latitude, et aucune tendance n'est perceptible en ce qui concerne la variation des erreurs en longitude en fonction de la latitude. La deuxième vérification de la précision faite à partir de points de contrôles entre le réseau et la carte au million de la série IMW, limitée au bassin du Rio Negro, a donné des résultats équivalents au projet GRFM pour la quantification des erreurs (à 90% inférieures à 2km). En outre ce test a montré un shift systématique de la mosaïque vers l'ouest et vers le sud qui semble indiquer que la correction faite par le projet GRFM a été trop forte en longitude (et inadéquate car il semble que la déformation soit polynomiale et non linéaire) et trop faible en latitude.

### 3.3. Adéquation des précisions avec l'objectif de modélisation de l'ensemble du bassin

Dans le tableau 3 sont présentés quatre paramètres permettant de décrire l'adéquation des données utilisées avec la tâche de modélisation spatialisée de l'ensemble du bassin: Moy ( $S_{bm} - S_{ba}$ ) et ET ( $S_{bm} - S_{ba}$ ), respectivement la moyenne et l'écart type de la différence entre la superficie des sous-bassins versants extraits manuellement ( $S_{bm}$ ) et automatiquement ( $S_{ba}$ ), Mot. Pond., la moyenne pondérée par la superficie du bassin, et le pourcentage d'extraction, c'est à dire la superficie totale extraite automatiquement par rapport à la superficie totale du bassin du Rio Negro.

	Réseau JERS	Réseau JERS - ordre 1	Réseau JERS - ordre 1 et 2
Moy ( $S_{bm} - S_{ba}$ )	10,7	9,4	12,8
ET( $S_{bm} - S_{ba}$ )	9,4	7,0	8,2
Moy. Pond.	12,7	6,5	8,4
Extraction (%)	84	95	93

Tableau 3

Les meilleurs résultats sont obtenus en surcreusant le MNT avec le réseau extrait de la mosaïque JERS moins les rivières d'ordre 1 suivant l'ordre de Strahler. Ainsi une précision trop grande du réseau est incompatible avec la précision du MNT, les petites rivières se rejoignant et créant des communications entre les sous-bassins au pas de 1km qui est celui du MNT. Globalement les résultats de l'extraction automatique sont satisfaisants pour notre objectif de modélisation.

### 3. CONCLUSION

Le MNT GTOPO30 au pas d'environ 1km, de précision altimétrique faible, corrigé par un réseau issu de la digitalisation d'une mosaïque d'images radar, ayant une résolution d'une centaine de mètres et une précision géographique de l'ordre de deux cellules de MNT (soit 2km), s'avère satisfaisant pour un objectif de

modélisation hydrologique spatialisée de l'ensemble du bassin Amazonien, dès lors que le découpage en sous-bassins se limite aux sous-bassins jaugés qui peuvent seuls permettre une validation de la modélisation.

#### Références

Chapman B., Wong A., Hess L. & Rosenqvist A. (1996) CD-ROM GRFM-South America, NASA/JPL  
Gupta V.K., Waymire E. & Wang C.Y. (1980) A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resources Research*, 16, 855-862  
Maidment D.R., Reed S.M., Akmansov S., McKinney D.C., de Oliveira F. & Ye Z. (1997) Digital atlas of the world water balance. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin  
Muller F., Seyler F., Cochonneau G. & Guyot J.L. (1999) Utilisation d'imagerie radar ROS JERS1 pour l'obtention de réseau de drainage. Exemple du Rio Négro (Amazonie) Manaus'99 – International Symposium on Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus (Brésil), 15 au 19 Novembre 1999

O'Callaghan J.F. & Mark D.M. (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 323-344

Razianoff S., Julien P., Cervelle B. & Chorowicz J. (1992) Extraction et analyse automatique d'un réseau hiérarchisé de thalwegs. Application à un modèle numérique de terrain dérivé d'un couple stéréoscopique SPOT. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 2, 337-364

Seyler F., Muller F., Cochonneau G. & Guyot J.L. (1999) Délimitation de bassins versants à partir d'un modèle Numérique de terrain. Comparaison de différentes méthodes pour le bassin du Haut Rio Négro (Amazonie) Manaus'99 – International Symposium on Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus (Brésil), 15 au 19 Novembre 1999

Seyler F., Muller F., G. Cochonneau, L. Guimarães & Guyot J.L. Watershed delineation of the Amazon sub-basins system using GTOPO30 DEM and a drainage network obtained from JERS SAR images. *Soumis à Hydrological processes Tarboton D.G., Bras R.L. & Rodriguez-Iturbe I. (1991) On the extraction of channel networks from digital elevation data. Hydrological processes*, 5, 81-100

Seyler Frédérique, Muller Frédéric, Cochonneau Gérard,  
Guyot Jean-Loup (2001)

Résolution et précision des outils numériques (MNT et image  
satellite) nécessaires à la délimitation de bassins versants en  
région tropicale

Brasilia : IRD, 11 p. multigr.