

Réalisation du référentiel hydrographique BD Carthage, sur le bassin de la Guyane à partir de données de télédétection

Sylvain Labbé¹, Sébastien Linares², Michel Pausader³, Konrad Rolland⁴

¹ Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture - IRSTEA, UMR TETIS,
Maison de la Télédétection, 500 rue Jean-François Breton, 34090 Montpellier, France
sylvain.labbe@teledetection.fr

² Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Guyane - DEAL
impasse Buzaré, BP 6003, 97306 Cayenne cedex, Guyane française
sebastien.linares@developpement-durable.gouv.fr

³ Institut Géographique National – IGN espace
6 av. de l'Europe, BP 42116, parc technologique du canal, 31521 Ramonville St-Agne, France
michel.pausader@ign.fr

⁴ Systèmes d'Information à Référence Spatiale - SIRS
27 rue du Carrousel, Parc de la Cimaise, 59 650 Villeneuve d'Ascq, France
konrad.rolland@sirs-fr.com

Abstract. Knowledge of the hydrographic network is an important issue for the management of environmental and water resources. So far French Guiana does not have a complete and homogeneous mapping throughout its territory. Furthermore, the tropical rainforest environment is not conducive to the development of conventional mapping techniques.

Using remote sensing, it was possible to make a hydrographic network throughout the watershed of French Guyana. Using proven techniques, treatments have been improved by combining different sources of high resolution data : the Digital Elevation Model from the SRTM, existing ortho-images complemented by the availability of SPOT data doubled with cloud removal. A broad partnership approach has helped to consolidate the results with existing data from French Guiana, Suriname and Brazil.

The database produced matches the french national BD Carthage® model, while being tailored to Amazonian specificity. It is a complete and consistent from a hydrological point of view throughout the watershed and usable with a decametric accuracy. The robustness of the treatment was tested in forest landscapes in mountainous landscape. However, these limits are very sensitive in anthropogenic environments and flat areas.

Keywords: remote sensing, hydrographic network, hydrology, water resources, basin of French Guiana, repository.

Résumé : La connaissance du réseau hydrographique est un enjeu important pour la gestion de l'environnement et de la ressource en eau. Jusqu'à présent la Guyane française ne disposait pas d'une cartographie homogène et complète sur tout son territoire. Le milieu forestier tropical humide est peu propice au développement des techniques de cartographie classiques.

Avec la télédétection, il a été possible de réaliser un réseau hydrographique sur l'ensemble du bassin Guyanais. A partir de techniques éprouvés, les traitements ont été améliorées en combinant différentes sources de données de haute résolution : le modèle numérique de terrain du SRTM et des ortho-photographies existantes complétées grâce à la disponibilité de données SPOT dénuagées. Une large approche partenariale a permis de consolider les résultats avec les données existantes tant guyanaises que brésiliennes ou surinamaises.

La base de données produite est conforme au modèle de données du référentiel hydrographique français, la BD Carthage®, tout en étant adaptée aux spécificités du contexte amazonien. Elle est complète et cohérente d'un point de vue hydrologique sur tout le territoire du bassin et exploitable avec une précision décamétrique. La robustesse du traitement a été éprouvée dans les paysages forestiers au relief marqué. Cependant ces limites restent très sensibles en milieux anthropisés et sur les zones planes.

Mots clés : réseau hydrographique, hydrologie, ressource en eau, bassin de la Guyane, référentiel,

1. Introduction

L'eau est une ressource essentielle qui contribue aux grands équilibres écologiques et répond aux besoins vitaux des populations. En Guyane française, malgré son abondance, cette ressource encore mal connue est soumise à de fortes pressions, et son utilisation reste mal maîtrisée.

L'absence d'information précise et homogène sur le réseau hydrographique ne permet pas une gestion satisfaisante de la ressource. La constitution d'un référentiel cartographique était une nécessité, tant pour répondre aux exigences réglementaires que pour la gestion de la ressource et l'amélioration de la connaissance des milieux.

Depuis les années 1990, le ministère français chargé de l'environnement a lancé la réalisation de la BD Carthage®, un référentiel national public sur le réseau hydrographique qui doit couvrir à terme tout le territoire national, régions ultra-périphériques comprises. Le projet a été décliné en Guyane à partir de 2008 avec pour objectif d'obtenir un référentiel des masses d'eau unique et cohérent couvrant de façon homogène l'ensemble du bassin hydrographique guyanais, bassins transfrontaliers compris. Tout en restant concordant avec les normes et standards nationaux, la BD Carthage® Guyane a été réalisée en prenant en compte les spécificités du contexte local amazonien.

Le plateau des Guyanes est caractérisé par un réseau hydrographique très riche du fait de sa position dans la zone climatique équatoriale humide et par un vaste massif forestier tropical. On dénombre six bassins de grande et moyenne importance, de surface variant entre 66 814 km² pour le Maroni et 8 477 km² pour la Comté, ainsi que de nombreux bassins côtiers de petite taille (figure 1).

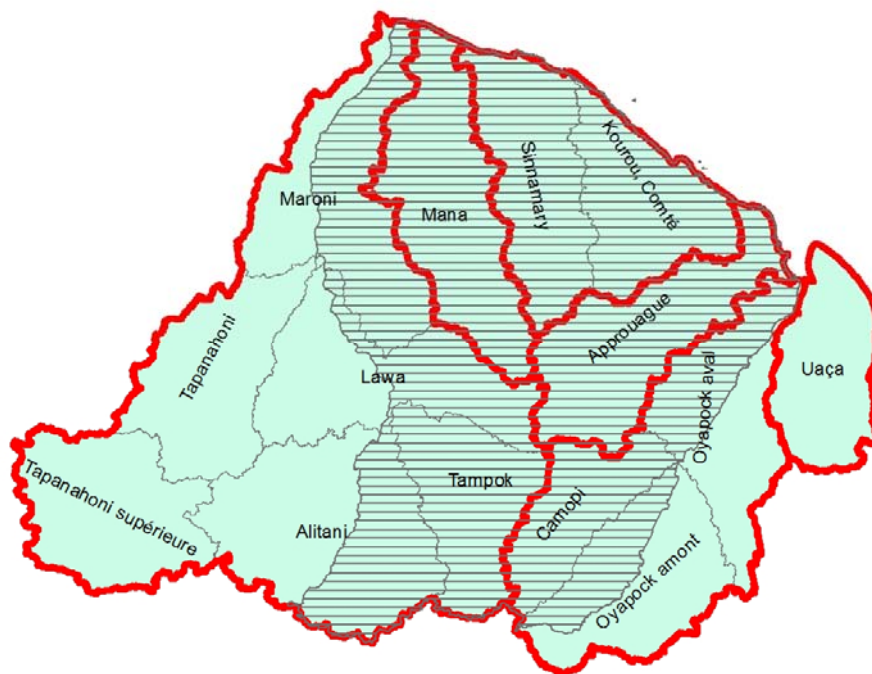


Fig. 1 – grands bassins versants intéressant le département de la Guyane

La topographie du territoire est marquée par un relief relativement plat sur la frange littorale, s'élevant progressivement vers l'intérieur avec une succession de plusieurs types de reliefs du nord au sud : une zone collinaire de 350 mètres d'altitude en moyenne, une chaîne de massifs centraux culminant à 830 mètres, et une pénéplaine méridionale de 150 mètres d'altitude maximum.

Les limites des bassins versants sont parfois imprécises du fait du manque de ligne de crête, particulièrement aux extrêmes Nord et Sud du territoire. Certains cols peuvent ainsi être occupés par des marécages qui permettent des communications entre bassins. D'autre part, le lit de nombreux cours d'eau demeure très instable et diffus, notamment dans les zones de plats et les marécages.

Aussi, le littoral Guyanais est marqué par un hydrodynamisme et une dynamique sédimentaire très prononcés, dûs essentiellement au courant Est-ouest qui disperse les sédiments du fleuve Amazone. Le trait de côte et la morphologie des embouchures de fleuves varient très rapidement. Les marées remontent les estuaires jusqu'au premier saut, qui se situe souvent à plusieurs dizaines de kilomètres en amont.

La pluralité des paysages et les caractéristiques topographiques illustrent la complexité physique de la région. Le chevelu hydrographique très dense repose sur une topographie peu marquée et difficilement observable par télédétection car masqué sous le couvert forestier et doublé d'une couverture nuageuse importante. Aussi la constitution des bases de données géographiques de l'hydrographie guyanaise a nécessité la mise en œuvre de techniques originales.

2. Méthodologie

La réalisation des bases de données hydrographiques en France métropolitaine a historiquement reposé sur la numérisation de cartes, elles-mêmes issues de photo-interprétation d'images aériennes et de compléments relevés sur le terrain. Cette approche ne pouvait être transposée à la Guyane compte tenu du manque de données (seul 20% du département est couvert par des photographies aériennes récentes ou des cartes à grande échelle) et de la spécificité des paysages guyanais, car, en dehors des grands cours d'eau, le réseau hydrographique est le plus souvent masqué par la forêt et se prête mal à une cartographie par photo-interprétation. Une alternative à cette méthode consistait à reconstituer le réseau hydrographique à partir de la morphologie du terrain en exploitant les données altimétriques (modèle numérique de terrain ou MNT) disponibles sur la Guyane. Cette approche, classique en modélisation hydrologique [Soille 1994], trouve toutefois ses limites dès que la pente du terrain est peu marquée, le réseau modélisé, non contraint par des versants identifiés, divague et ne représente plus la réalité du cours d'eau sur le terrain [Garbrechta 1997].

Une première analyse des pentes en fonction de la surface drainée a été réalisée à partir du modèle numérique de terrain SRTM [Jakob 2001]. Cette analyse montre (tableau 1) que les cours d'eau à l'amont des bassins versants sont pour l'essentiel canalisés par des thalwegs ayant des pentes bien marquées et qu'une analyse hydromorphologique depuis un MNT permet de restituer avec une bonne précision géométrique. En revanche dès que la surface drainée est supérieure à quelques dizaines de km², les cours d'eau sont majoritairement dans des zones plutôt planes.

| Surface drainée Amont | Linéaire partiel (km) | | Pente inférieure à 2% et % dans la classe | | Pente supérieure à 2% et % dans la classe | |
|----------------------------|--------------------------|-----|--|-----|--|-----|
| | km | % | km | % | km | % |
| S > 50 km ² | 13 946 | 9% | 8 354 | 60% | 5 593 | 40% |
| 5 < S < 50 km ² | 33 253 | 22% | 11 738 | 35% | 21 516 | 65% |
| S > 0,5 km ² | 102 767 | 69% | 21 045 | 20% | 81 722 | 80% |

Tableau 1 – Analyse de la pente au voisinage des cours d’eau en fonction de la surface drainée. Les cours d’eau sont extraits pour des surfaces drainées critiques de plus de 0,5 km²

Aussi la démarche retenue a proposé de combiner une extraction du réseau depuis le MNT pour les petits cours à l’amont des bassins versants et l’imagerie aérienne ou satellitaire pour les cours d’eau plus importants, et de ce fait non masqués par la forêt.

L’objectif des acteurs guyanais visait à construire une base de données hydrographique de précision équivalente à une carte au 1/100 000^e, ce qui a conduit à rechercher des données de précision métrique à décimétrique. Aussi cette base de données a associé :

- un modèle numérique de surface (MNS) réalisé par la navette spatiale en 2000 (mission SRTM [Jakob 2001]) à une seconde d’arc de résolution, pour déterminer, par modélisation de l’écoulement sur ce MNS, la position des petits cours d’eau;
- des images satellite de moyenne à haute résolution spatiale (2,5 m à 30 m), Landsat et Spot, pour numériser les grands cours d’eau (visibles sur les images) par photo-interprétation ;
- des images aériennes à très haute résolution spatiale (0,50 m) sur 16 000 km² de zones anthropisées, où la pression sur les ressources en eau est importante.

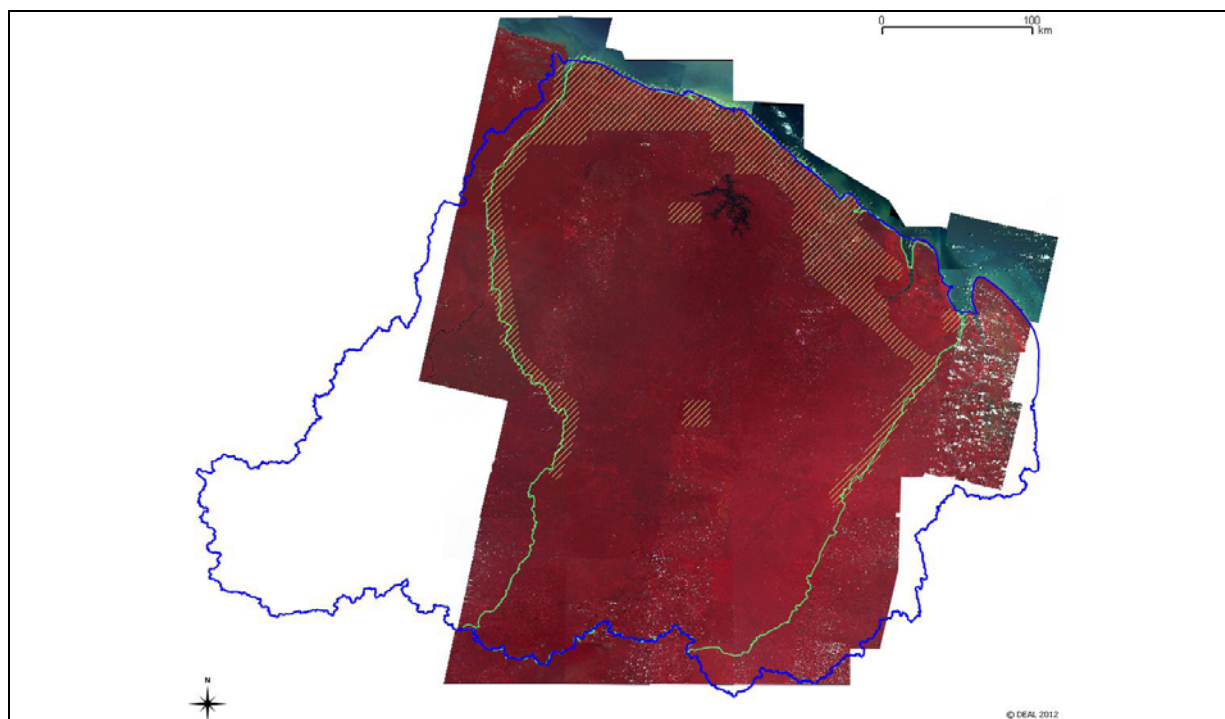


Fig. 2 Données disponibles avec : En bleu la limite des bassins versants intéressant le territoire guyanais, en vert la limite du département de la Guyane, en hachures oranges la zone couverte par des ortho-images aériennes à 50 cm, la mosaïque Spot disponible (infrarouge couleur), le restant du territoire est couvert par la mosaïque d’images Landsat TM.

3 - Constitution du jeu de données image de référence

La mosaïque dénuagée réalisée par l'IGN à partir d'images SPOT achetées par le ministère de la Défense français, est une des composantes principales. Cette mosaïque couvre l'intégralité de la Guyane plus une zone autour d'environ 10 km de large. Les images satellite avec leurs nombreuses occurrences d'acquisition et leur fauchée importante offrent des possibilités intéressantes pour obtenir la couverture d'un territoire étendu comme la Guyane. Quand il s'agit d'une zone où le couvert nuageux est extrêmement fréquent une acquisition unique n'est pas suffisante. On utilise alors le processus de foisonnement. Pour chaque zone au sol on acquiert plusieurs images à des dates différentes telles qu'en utilisant les parties non nuageuses de chacune on arrive à reconstituer une image à peu près complète sans nuage. Pour minimiser le coût d'acquisition et de traitement il faut au fur et à mesure de l'acquisition déterminer le lot d'images optimal (c'est-à-dire celui qui permet d'obtenir la couverture maximale avec un nombre minimal d'images) et le pourcentage de couverture obtenu. Ce processus a été réalisé en utilisant les quick-looks des images SPOT 5 à 120 m de résolution. Sur ces quicks-looks un masque grossier de nuages a été extrait et c'est l'empilement de ces masques qui a permis la sélection des images. Le satellite SPOT 5 a été programmé pour acquérir des images à chaque passage en visibilité de la Guyane. Pour obtenir une couverture satisfaisante il a été nécessaire d'utiliser des images des années 2007 et 2008. Il faut 45 KJ (zones élémentaires de 60 km par 60 km) pour couvrir la Guyane et la zone périphérique. La sélection s'est faite sur un lot de 700 images après élimination de nombreuses images complètement nuageuses. Le nombre d'images retenu finalement est de 200 soit 4 à 5 images par zone au sol.

Toutes les images sélectionnées ont été ensuite modélisées géométriquement par processus de spatio-triangulation. Cette opération nécessite la prise de points d'appui et de points homologues sur toutes les images. Ces points qui sont au sol sont souvent masqués soit par les nuages soit par le couvert forestier. Or le MNT utilisé pour l'orthorectification est le SRTM, qui n'est pas au niveau du sol mais presque au niveau de la canopée, ce qui entraîne des décalages sur les visées obliques. Au final la précision géométrique des orthoimages est estimée à environ 10 m. Ces images ont été ensuite dénuagées et mosaïquées. Il a été nécessaire de les harmoniser radiométriquement. Au final il en est résulté une mosaïque complète de la Guyane au pas de 2,5 m (en deux versions : couleurs pseudo-naturelles et fausses couleurs presque entièrement dénuagée), ce qui constitue la première couverture exhaustive depuis les prises de vue aériennes des années 1950. (figures 1 et 2).

En complément de la mosaïque d'images SPOT 5. Deux autres sources de données image ont été utilisées.

La dernière orthophotographie BD ORTHO© a été produite par l'IGN à partir de prises de vues aériennes réalisées en 2005 et 2006 dans le cadre de son programme périodique. Cette ortho-image a un pas de 0,5 m et couvre une grande partie de la zone côtière et des fleuves frontaliers est et ouest. La zone couverte est d'environ 16 000 km². (Figure 2.C)

Pour couvrir les zones Surinamiennes et Brésiliennes en dehors de la mosaïque SPOT, les mosaïques d'images Landsat TM « geocover » au pas de 30 m (1990) et 15 m (2000) ont été utilisées. Ces mosaïques d'images couvrent la totalité de la planète et sont libres d'accès. (figure 2.A)

Les images indiquées ci-dessus ont servi à photo-interpréter le réseau hydrographique principal visible sur les images. Là où il y avait plusieurs sources d'images, il a été décidé d'utiliser, les plus résolues, soit la BD ORTHO©, sur les zones où elle est disponible, Spot5 sur le reste de la Guyane et Landsat TM au Suriname et au Brésil. Les échelles de photointerprétation ont été ainsi spécifiées pour les trois zones (respectivement 1/10 000^e, 1/20 000^e et 1/80 000^e) et ont conduit à numériser près de 14 320 km de cours d'eau.

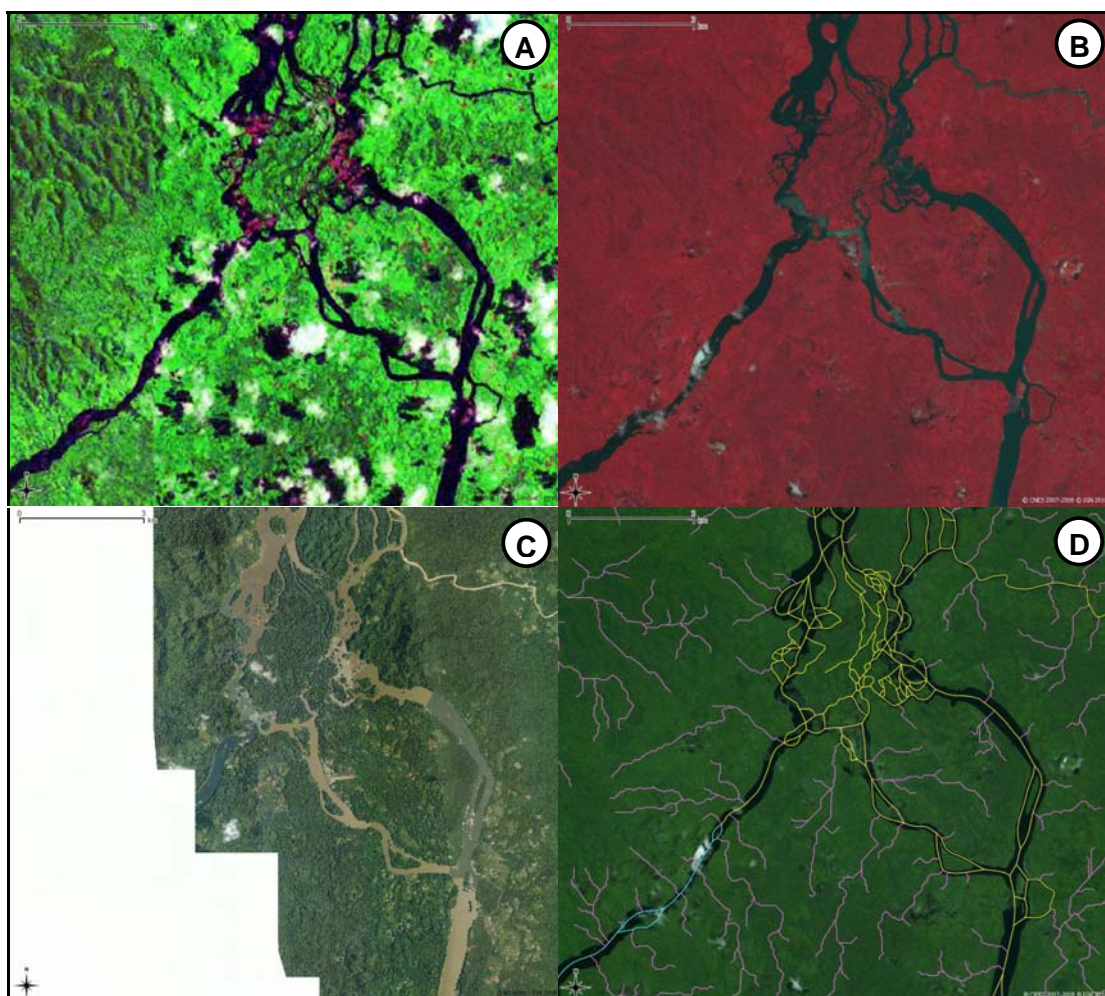


Fig. 3 – Illustration des différentes sources d'images utilisées, confluence du Lawa et de la Tapanahoni à la frontière surinamaïse.

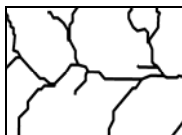
En A, la mosaïque d'images Landsat TM de 1990 à 30 cm de résolution en composition colorée (Moyen Infra Rouge, MIR, en rouge, proche infra rouge, PIR, en vert et le vert en bleu). En B, la mosaïque d'image Spot 5 en fausses couleurs Infra Rouge. En C l'orthophotographie BD ortho© en couleurs naturelles. En D, la mosaïque Spot 5 en pseudo couleurs naturelles, avec la représentation du réseau hydrographique photo-interprété : en jaune le réseau issu de l'orthophotographie ; en bleu clair le réseau issu de la mosaïque Spot ; en rose le complément extrait du SRTM.

4 - Extraction du réseau hydrographique

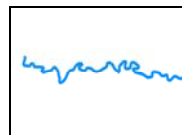
L'extraction du réseau hydrographique depuis un modèle numérique de terrain (MNT) est aujourd'hui une opération classique implémentée dans la plupart des logiciels SIG raster. Dans ce projet c'est un modèle numérique de surface (MNS SRTM) qui a été utilisé. Ce MNS représente l'altitude du toit du couvert (canopée) alors que l'eau s'écoule sur le MNT (sol). La modélisation suppose donc que la hauteur de la canopée soit constante, cette approximation bruite le tracé du réseau extrait. De plus ce réseau théorique extrait du MNS a tendance à divaguer dès que le terrain est plat (car les pentes sont mal définies) et cette divagation est d'autant plus importante dès que la différence d'altitude sol/sur-sol varie, par exemple à la lisière forêt/parcelle agricole ou forêt/zone urbaine, etc.

A ces imprécisions géométriques s'ajoutent des approximations hydrologiques et de calcul fortes : les stockages et transferts d'eau souterrains sont négligés, et on suppose une contribution spatiale homogène des apports d'eau par précipitation ; les algorithmes s'appuient beaucoup sur la direction de la pente, variable très sensible à l'échantillonnage spatial retenu, et utilisent des modèles d'écoulements très simplifiés (type D8). [O'Callaghan 1984]

Pour limiter ces approximations la méthode retenue prévoit de remplacer le réseau du MNT par le réseau photointerprété dès que celui-ci est disponible, ie visible sur les images. Cette technique pose un problème au point de jonction, les deux réseaux (modélisés et photo interprétés) n'étant généralement pas exactement superposés. Pour garantir la continuité topologique du réseau le choix retenu a été de forcer au sein du MNT le chemin de l'eau sur les cours d'eau photo interprétés. Cette technique, connue sous le nom de « stream burning » [Turcotte 2001] consiste à creuser artificiellement le MNT là où doit s'écouler l'eau (figure 4).



Réseau modélisé initial sur le
MNS SRTM



Réseau photointerprété sur
les images



Réseau modélisé après
stream burning

Fig. 4 – Combinaison du réseau photointerprété et modélisé par « stream burning »

Après vérification sur le terrain de la taille des cours d'eau, la surface drainée critique retenue pour l'extraction du réseau hydrographique a été fixée à 0,2 km² (débit spécifique moyen de 5 l/s), ce qui conduit à environ 192 000 km de réseau au total

5 – Résultats et discussions

L'ensemble du réseau hydrographique guyanais, en incluant les bassins versants transfrontaliers, couvre une surface totale de 141 300 km² :

- 84 100km² pour le département de Guyane,
- 39 100 km² au Suriname (bassin versant du Maroni) et
- 18 100 km² au Brésil (bassin versant de l'Oyapock et du rio Uaçà)

| Couche | Type | Origine | Surface (km ²) ou linéaire (km) | Nombre d'objets |
|----------------------------|------------|------------------|---|-----------------|
| 1. Hydrographie surfacique | Surfacique | PIAO | 1 462,90 | 262 |
| 2. Hydrographie de texture | Surfacique | Données externes | 8 498,75 | 1 759 |
| 3. Région | Surfacique | SRTM | 141 726,68 | 5 |
| 4. Secteur | Surfacique | SRTM | 141 726,68 | 14 |
| 5. Sous-secteur | Surfacique | SRTM | 141 726,68 | 72 |
| 6. Zone | Surfacique | SRTM | 141 726,68 | 257 |
| 7. Tronçons | Linéaire | SRTM + PIAO | 191 935,48 | 254 431 |
| 8. Cours d'eau | Linéaire | SRTM + PIAO | 182 537,13 | 115 218 |
| 9. Nœuds | Ponctuel | | | 252 126 |
| 10. Points d'eau isolés | Ponctuel | Données externes | | 303 |
| 11. Trait de côte | Linéaire | SRTM + PIAO | 842,40 | 167 |

Tableau 2 – Bilan quantitatif et origine des données par couche.

Les couches 2 et 10 ont été réalisées en intégrant et en adaptant des bases de données déjà existantes. Les couches 1 et 2 représentent les surfaces en eaux, eau libre pour l'hydrographie surfacique, et les zones humides pour l'hydrographie de texture. Les couches 3 à 6 représentent le zonage hydrographique (bassins versants) avec une décomposition hiérarchique en surface. Les couches 7 et 8 représentent le linéaire hydrographique, les cours d'eau selon une cohérence hydronymique et les tronçons selon un découpage topologique cohérent d'un point de vue hydrologique. La couche 9 correspond aux nœuds hydrographiques issus du découpage topologique des tronçons, ainsi que la représentation de certains objets ponctuels liés au réseau hydrographique. Les points d'eau isolés sont des objets sans lien avec les précédents objets. Le trait de côte correspond à la limite entre la masse d'eau océanique et les zones de terres fermes ou végétalisées du littoral.

| Source de numérisation | Nombre d'objets | Linéaire (km) |
|----------------------------|-----------------|---------------|
| SRTM | 228 782 | 176 884,54 |
| Mosaïque SPOT 2009 | 15 621 | 8 927,60 |
| Mosaïque LANDSAT 1990-2000 | 2 028 | 1 382,37 |
| BD ortho 2005-2006 | 7 375 | 4 010,87 |
| TOTAL | 508 336 | 191 935,48 |

Tableau 3 – Détail de l'origine géométrique des objets de la couche « tronçons »

Les 192 000 km de réseau représentent ainsi une densité de 1,36 km de rivière par km² de terrain. Cette valeur est proche de celle des référentiels équivalents utilisés dans les Antilles (1,5 km/km²) et reste comparable aux ratios métropolitains (0,92km/km²), permettant ainsi l'élaboration de documents homogènes à l'échelle nationale.

La qualité géométrique des 14 320 km de réseau extrait depuis les images est bonne au regard de l'échelle d'utilisation (1/100 000^e). En moyenne ce réseau photointerprété permet de restituer les cours d'eau dont la surface du bassin versant dépasse 250 km².

Le réseau extrait du MNS SRTM est de bonne qualité dans les zones de pentes, où les cours d'eau ont forgé des ravines. Ce phénomène est courant dans l'amont des bassins versants, ce

qui représente près de 171 000 km de petits cours d'eau. Plusieurs levés sur le terrain ont permis de vérifier cette bonne correspondance entre le réseau extrait du MNS et la réalité. Les 6 600 km de cours d'eau correspondant aux classes intermédiaires de bassin versant (principalement entre 50 et 250 km²) sont difficiles à positionner avec des images en zone de forêt. L'imprécision géométrique sera assez importante (ordre de grandeur de quelques dizaines à centaines de mètres) avec un tracé extrait du MNS qui pourra être non représentatif de la réalité terrain (ie tracé rectiligne sur la carte alors que le cours d'eau dessine des méandres sur le terrain).

En synthèse le résultat produit est un réseau hydrographique exhaustif mais hétérogène en précision. Il est topologiquement correct (l'eau s'y écoule de l'amont à la mer sans discontinuité) et chaque tronçon est décrit par des indicateurs hydromorphologiques comme la taille du bassin amont ou le rang de Strahler (figure 6)

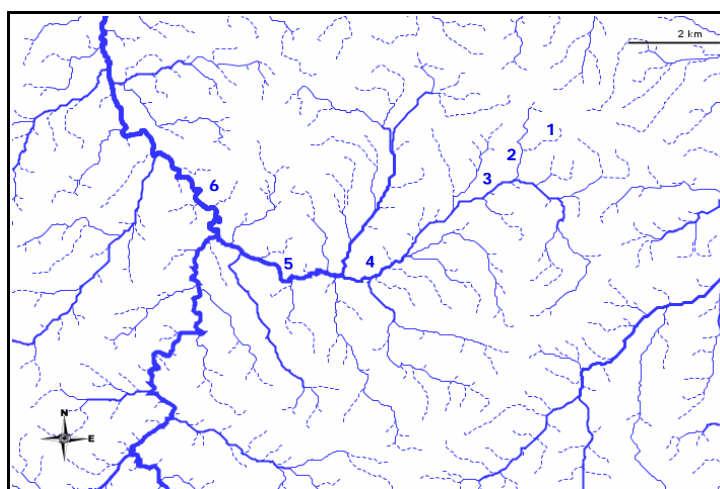


Fig. 5 – extrait de la BD Carthage® avec une symbologie selon le rang de Strahler

6 – Conclusions

La validation de la BD Carthage® Guyane en 2011 au niveau national marque l'aboutissement du premier référentiel hydrographique de la Guyane française. Il est désormais reconnu à ce titre comme une composante du référentiel français, le Système d'Information sur l'Eau (SIE), conforme aux spécifications du cadre de référence BD Carthage®.

L'abaissement de l'échelle de référence du 1 / 50 000^e au 1 / 100 000^e a permis d'intégrer les données issues de télédétection, sans lesquelles il aurait été impossible de couvrir la totalité du bassin hydrographique. Elles ont également permis de travailler plus facilement sur les bassins frontaliers.

Auparavant la Guyane n'était couverte que de données hydrographiques disparates. La totalité du territoire n'était représentée qu'au 1/500 000^e, soit 32 800 km linéaires sur 84 000 km² alors que la BD Carto® au 1/50 000^e représentait un linéaire de 39 500 km pour seulement 26 600 km². La BD Carthage® améliore très nettement la connaissance du réseau hydrographique en précisant, pour le seul territoire de la Guyane française, le linéaire hydrographique à 112 000 km. Elle introduit une cohérence hydrologique qui n'existait pas dans la représentation des données géographiques et dans leurs renseignements attributaires. La décomposition du zonage hydrographique offre également une représentation plus fine des

bassins versants. Cependant comme pour l'hexagone, la création des bassins versants élémentaires pour chaque cours d'eau seraient une piste d'amélioration attendue.

La base de données est désormais disponible librement en ligne. Elle est accessible depuis le portail *eaufrance* du SIE, en téléchargement ou en accès distant par flux WMS/WFS. La base pourra évoluer au rythme des mises à jour annuelles de la BD Carthage®. Les mises à jour se feront sur la base des données validées localement par un comité d'utilisateur ou par le site public de remontée d'information de l'IGN.

Plusieurs axes d'améliorations pourront être mis en œuvre, comme la caractérisation des données en renforçant les descriptions attributaires et principalement la toponymie. Les insuffisances de la géométrie dans les zones planes pour les têtes de bassin ou les confluences pourront éventuellement être complétées à partir de remontées d'observation de terrain, seules sources actuelles permettant de pallier les limites de la télédétection.

Bibliographie

Soille P, Gratin C., An efficient algorithm for drainage network extraction on DEMs, short communication, **Journal of Visual Communication and Image Representation**, 1994, Vol 5 n°2, pp181-189.

Garbrechta J, Martzb LW , The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digitalelevationmodels, **Journal of Hydrology**, Volume 193, Issues 1–4, 1 June 1997, Pages 204–213

Jakob J. van Zyl, The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography, **Acta Astronautica**, Volume 48, Issues 5–12, March–June 2001, Pages 559–565

O'Callaghan J F., Marka D.M., The extraction of drainage networks from digital elevation data, **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, Volume 28, Issue 3, December 1984, Pages 323–344

Turcotte R et al , Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network, **Journal of Hydrology**, Volume 240, Issues 3–4, 10 January 2001, Pages 225–242

Ressources en ligne

Atlas-catalogue du SANDRE, permettant de consulter les fiches de métadonnées et de télécharger la base de données, disponible à cette adresse :

<http://www.sandre.eaufrance.fr/atlascatalogue/>