

Calcul des distributions d'indices topographiques sur 16 bassins versants québécois à l'aide de **PHYSITEL**

Rapport final

Agriculture et Agroalimentaire Canada

Rédigé par:

Alain N. Rousseau
Alain Royer
Jalal Khaldoune

Centre Eau, Terre et Environnement
Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE)
490, rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9

Rapport N° R-903

31 mars, 2006

© Alain N. Rousseau, 2006

ISBN : 2-89146-434-6

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES SIGLES.....	XI
1. INTRODUCTION.....	1
2. DÉTERMINATION DE L'IT AVEC PHYSITEL.....	3
2.1. IMPORTATION DU MNA	3
2.2. IMPORTATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE.....	4
2.3. CALCUL DU RÉSEAU MATRICIEL.....	6
2.4. CALCUL DU MNA MODIFIÉ.....	6
2.5. CALCUL DE LA PENTE.....	6
2.6. CALCUL DES ORIENTATIONS	10
2.7. CALCUL DU BASSIN (MATRICE D'ACCUMULATION).....	11
2.8. CALCUL DE L'INDICE TOPOGRAPHIQUE	12
3. RÉSULTATS ET CONCLUSION	13
4. RÉFÉRENCES	15
ANNEXE A. COMPUTATIONAL PROCEDURE OF THE TOPOGRAPHIC INDEX USING PHYSITEL.....	17
A.1 INTRODUCTION.....	18
A.2 PHYSITEL SOFTWARE AND TI COMPUTATION.....	18
A.2.1. PHYSITEL	18

A.2.2.	Calculation of ti on the Yamaska watershed.....	26
A.3	CONCLUSION.....	29
A.4	REFERENCES.....	29
ANNEXE B. ÉTAPES DE VÉRIFICATION DE LA CONNECTIVITÉ DES RÉSEAUX DES 16 BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE .....31		
B.1	INTRODUCTION.....	32
B.2	DESCRIPTION DE LA MÉTHODE.....	33
B.3	PRÉPARATION DES FICHIERS.....	34
B.3.1.	Première étape: Isoler chaque rive dans un « Shape file ».....	34
B.3.2.	Deuxième étape: Segmentation des rives.....	35
B.3.3.	Troisième étape: Affichage du résultat du calcul de la médiane.....	36
B.3.4.	Quatrième étape: Suppression des deux rives des cours d'eau.....	36
B.3.5.	Cinquième étape: Connexion des affluents au cours d'eau.....	37
B.4	REMARQUE.....	38
ANNEXE C. DISTRIBUTION CARTOGRAPHIQUE DE L'IT POUR CHACUN DES 16 BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE.....41		

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 :	Fichier ascii du modèle numérique d'élévation (ASCII/Grid).....	3
Figure 2.2:	Importation et édition du MNA du bassin de la rivière Yamaska.....	4
Figure 2.3 :	Importation et édition du réseau vectoriel du bassin de la Yamaska	5
Figure 2.4:	Mise en format matriciel du réseau hydrographique vectoriel de la Yamaska	7
Figure 2.5 :	Propriétés du MNA modifié du bassin suite au brûlage du réseau hydrographique.....	8
Figure 2.6 :	Calcul de la pente du MNA original du bassin de la Yamaska.....	9
Figure 2.7 :	Calcul des orientations du bassin de la Yamaska	10
Figure 2.8 :	Masque du bassin (matrice d'accumulation) de la Yamaska	11
Figure 2.9 :	Distribution des valeurs d'TI pour le bassin de la Yamaska.....	12
Figure A. 1 :	Importation and edition of the initial DEM of the Yamaska river watershed.	20
Figure A. 2 :	Computation of slope on the original (unaltered) DEM of the Yamaska river watershed.....	21
Figure A. 3 :	Importation and edition of the DRLN of the Yamaska watershed.	22
Figure A. 4 :	Rasterization and edition of the DRLN of the Yamaska watershed.....	23
Figure A. 5 :	DEM "burning".....	24
Figure A. 6 :	Determination and edition of the flow direction matrix.....	25
Figure A. 7 :	Determination of the flow accumulation matrix.....	26
Figure A. 8 :	Comparison of <i>TI</i> distributions obtained by the D8-LTD, D8-LAD, Arc Hydro (D8) and PHYSITEL (D8) for the Yamaska river watershed (resolution 19m).....	28
Figure A. 9 :	Histograms of <i>TI</i> distributions obtained by the D8-LTD, D8-LAD, D8 of Arc Hydro (D8) and PHYSITEL (D8) on the Yamaska river watershed.....	29

Figure B. 1 :	Le bassin versant de la rivière Etchemin : (a) cours d'eau représenté par deux rives et (b) cours d'eau débouchant sur un autre cours d'eau.	33
Figure B. 2	Numérisation des rives du cours d'eau à l'aide de l'outil de numérisation du menu EDITOR d'ArcGIS (encart) et enregistrement dans un « « Shape file » »	34
Figure B. 3	Division des deux rives en plusieurs segments de 5 m de distance à l'aide de l'outil « divide » du menu d'Édition d'ArcGIS (encart).....	35
Figure B. 4	Transformation des points de la médiane en ligne	36
Figure B. 5	Résultat du calcul de la médiane du cours d'eau	37
Figure B. 6	L'application de la règle de topologie pour la connexion du réseau hydrographique.....	38
Figure B. 7	Exemple d'anomalie : zone de divergence de la rivière	39
Figure C. 1	Bassin versant de la rivière Acadie : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	43
Figure C. 2	Bassin versant de la rivière Achigan : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.....	45
Figure C. 3	Bassin versant de la rivière Bayonne : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.....	47
Figure C. 4	Bassin versant de la rivière Beurivage : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.....	49
Figure C. 5	Bassin versant de la rivière Boyer : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des	

	valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	51
Figure C. 6	Bassin versant de la rivière Chibouet : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	53
Figure C. 7	Bassin versant de la rivière Coaticook1 : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	55
Figure C. 8	Bassin versant de la rivière Coaticook2 : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	57
Figure C. 9	Bassin versant de la rivière Des Anglais : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	59
Figure C. 10	Bassin versant de la rivière Des Hurons : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	61
Figure C. 11	Bassin versant de la rivière Du Chêne : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	63
Figure C. 12	Bassin versant de la rivière Etchemin : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	65
Figure C. 13	Bassin versant de la rivière Mascouche : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la	

	distribution des valeurs de l'ITT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.....	67
Figure C. 14	Bassin versant de la rivière Nicolet : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'ITT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'ITT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.....	69
Figure C. 15	Bassin versant de la rivière Noire : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'ITT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'ITT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	71
Figure C. 16	Bassin versant de la rivière Saint-Esprit : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'ITT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'ITT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.....	73
Figure C. 17	Bassin versant de la rivière Yamaska : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'ITT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'ITT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1:	Comparaison des paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT sur les bassins versants à l'étude (maximum, minimum, moyenne, médiane, écart type) obtenus avec PHYSITEL incluant l'algorithme D8-LTD avec ceux obtenus suite à l'utilisation de l'algorithme D8-LTD sans attention particulière aux régions plane et aux lacs.....	14
--------------	---	----

LISTE DES SIGLES

D8	Deterministic-8 Node Algorithm
DEM	Digital Elevation Model
DRLN	Digital River and Lake Network
IT	Indice Topographique
IROWC-P	Indicators of Risk of Water Contamination - Phosphorus
LAD	Least Angular Deviation
LTD	Least Transversal Deviation
SIG	Système d'Information Géographique
TI	Topographic Index
TFD	Tracking Flow Direction
W-M	Wolock and McCabe

1. INTRODUCTION

Un des avantages de l'utilisation de l'indice de similitude hydrologique de Kirby [1979] (*i.e.*, l'indice topographique, IT) repose sur la possibilité de le calculer automatiquement avec un SIG (ex. : Quinn *et al.*, [1995]). Nous avons récemment complété une étude qui a permis d'évaluer trois procédures géomatiques de calcul de l'IT (procédures D8, D8-LAD et D8-LTD) sur 16 bassins versants québécois et de collaborer avec AAC à l'intégration de cette procédure dans le calcul de la *Composante Hydrologique* de l'IROWC-P [van Bochove *et al.*, 2006]. Les principaux livrables et conclusions de notre étude étaient [Rousseau *et al.*, 2005] :

- (i) développement d'une procédure basée sur l'intégration et la préparation du MNA ainsi que le brûlage du réseau hydrographique numérisé dans le MNA;
- (ii) obtention de très bons résultats dans tous les cas;
- (iii) identification de problèmes associées avec les procédures D8 (génération de lignes d'écoulement parallèle) et D8-LAD (production de valeurs "Nodata");
- (iv) validation positive de la procédure D8-LTD;
- (v) anomalies persistantes avec les régions planes et les lacs; et
- (vi) besoin de développer une procédure capable de surmonter tous ces problèmes (par exemple les procédures W-M [Wolock et McCabe, 1995], TFD [Pan *et al.*, 2004] et PHYSITEL).

Afin de répondre aux points (v) & (vi) du paragraphe précédent, nous avons conduit dans un premier temps une étude préliminaire qui a porté sur l'utilisation de PHYSITEL pour calculer l'IT – contribution spontanée de l'INRS-ETE au projet. Les résultats de cette étude, présentés à l'annexe A de ce rapport, ont démontré qu'il était possible d'utiliser PHYSITEL pour calculer l'IT et que cette approche permettait d'éliminer les anomalies liées aux régions planes et les lacs [Hentati et Rousseau, 2005]. À noter que l'élimination de ces anomalies découle de la prise en compte par PHYSITEL du réseau hydrographique du bassin versant [Turcotte *et al.*, 2001].

Ceci étant dit comme PHYSITEL utilise la procédure D8 pour déterminer la matrice d'écoulement d'un bassin versant, nous profiterons de ce projet pour substituer cette procédure dans PHYSITEL par celle d'Orlandini *et al.* [2003], c'est-à-dire la procédure D8-LTD qui s'est montrée supérieure aux procédures D8 et D8-LAD [Rousseau *et al.*, 2005]. Ainsi, l'objectif de ce travail est de présenter la méthode de calcul de l'IT basée sur l'utilisation de la nouvelle version de PHYSITEL [Royer *et al.*, 2006] ainsi que les résultats obtenus sur les 16 bassins versants québécois à l'étude.

Ce rapport est organisé en deux principaux chapitres et deux annexes. Le premier de ces deux chapitres, le chapitre deux présente les étapes à suivre lors de l'utilisation de PHYSITEL pour le calcul de l'IT. Le deuxième, le chapitre trois fait le point sur les résultats obtenus sur les 16 bassins versants québécois. Les deux annexes viennent enrichir et compléter la présentation des deux chapitres. La première annexe (l'annexe A), tel que mentionné précédemment, présente les résultats d'une contribution de l'INRS-ETE sur le potentiel d'utilisation de PHYSITEL pour calculer l'IT. Enfin l'annexe B vient détailler les étapes de vérification de la connectivité des réseaux hydrographiques des 16 bassins à l'étude.

2. DÉTERMINATION DE L'IT AVEC PHYSITEL

L'utilisation de PHYSITEL pour calculer la distribution de l'IT sur un bassin versant requiert la réalisation des étapes de travail suivantes : (i) l'importation du modèle numérique d'altitude (MNA), (ii) l'importation du réseau hydrographique numérisé, (iii) calcul du réseau matriciel, (iv) calcul du MNA modifié, (v) calcul de la pente, (vi) calcul des orientations, (vii) calcul du bassin, et (viii) calcul de l'IT. Les prochains paragraphes apportent une description détaillée de ces huit étapes de travail.

2.1. IMPORTATION DU MNA

La première étape consiste à importer le MNA. Celui-ci doit être en format ASCII/Grid (voir figure 2.1). Lorsque le contour du bassin versant est connu, il est préférable de découper le MNA pour permettre des calculs plus rapides avec PHYSITEL. Ceci étant dit, il est important de conserver une zone tampon lors du découpage afin de ne pas perdre trop d'information. La projection du MNA doit être fournie. PHYSITEL comporte une centaine de projections et il est possible d'en ajouter de nouvelle dans le fichier « MAPINFOW.PRJ ».

Une fois l'importation terminée (voir figure 2.2), il est possible d'effectuer quelques traitements sur le MNA dans le menu « Traitement ». Comme par exemple un filtre pour lissé le MNA est disponible et il est également possible de traiter les extremums.

```
ncols          2156
nrows          1310
xllcorner      188819.17
yllcorner      4997989.16
cellsize       19.26869127558199300
NODATA_value   -9999
-9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0
-9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0
-9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0 -9999.0
...
```

Figure 2.1 : Fichier ascii du modèle numérique d'élévation (ASCII/Grid)

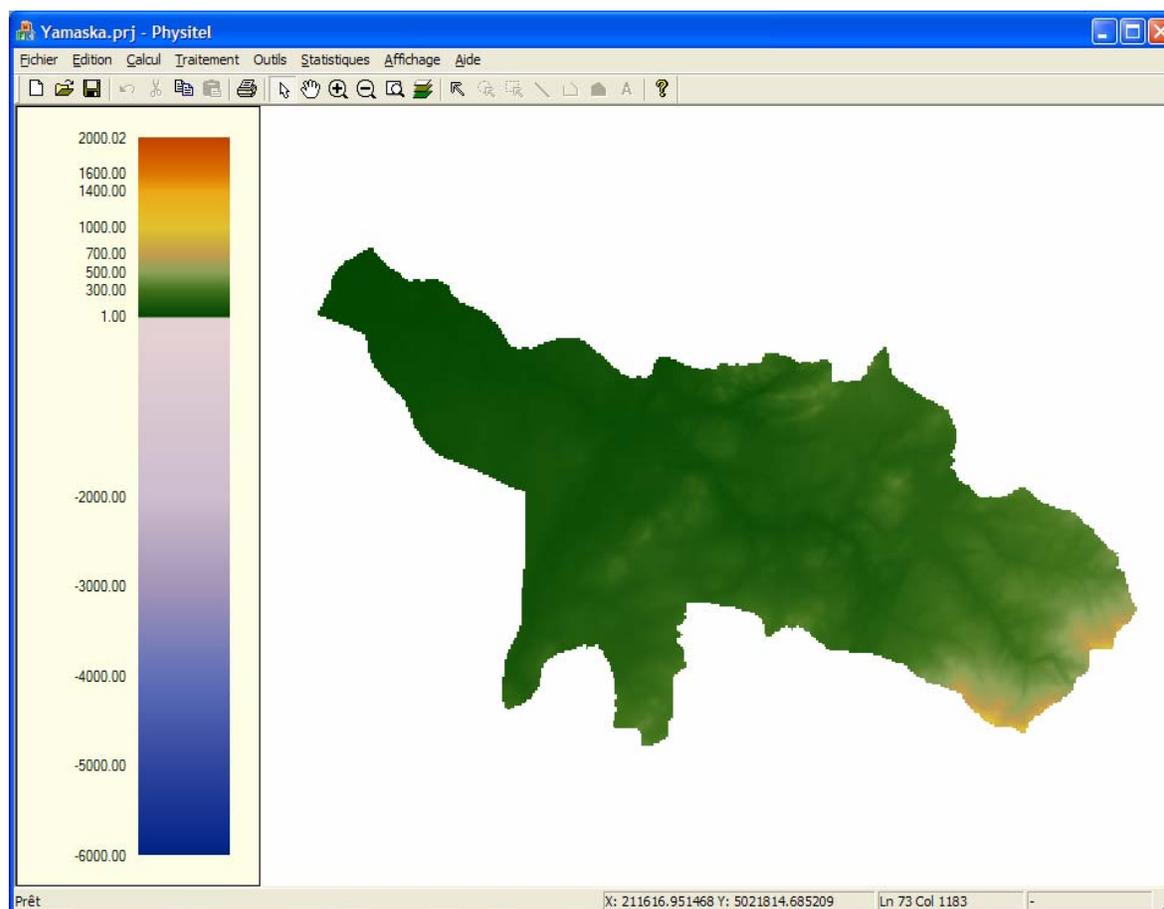


Figure 2.2: Importation et édition du MNA du bassin de la rivière Yamaska

2.2. IMPORTATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

La deuxième étape consiste à importer le réseau hydrographique composé de rivières et de lacs. Il est possible d'importer des fichiers vectoriels au format « Shape file » ainsi qu'au format « ASCII » avec PHYSITEL. Pour importer le réseau vectoriel il suffit de sélectionner le menu « Affichage / Réseau vectoriel ». Les rivières sont représentées par des vecteurs de type ligne ou poly ligne et les lacs par des régions (voir figure 2.3).

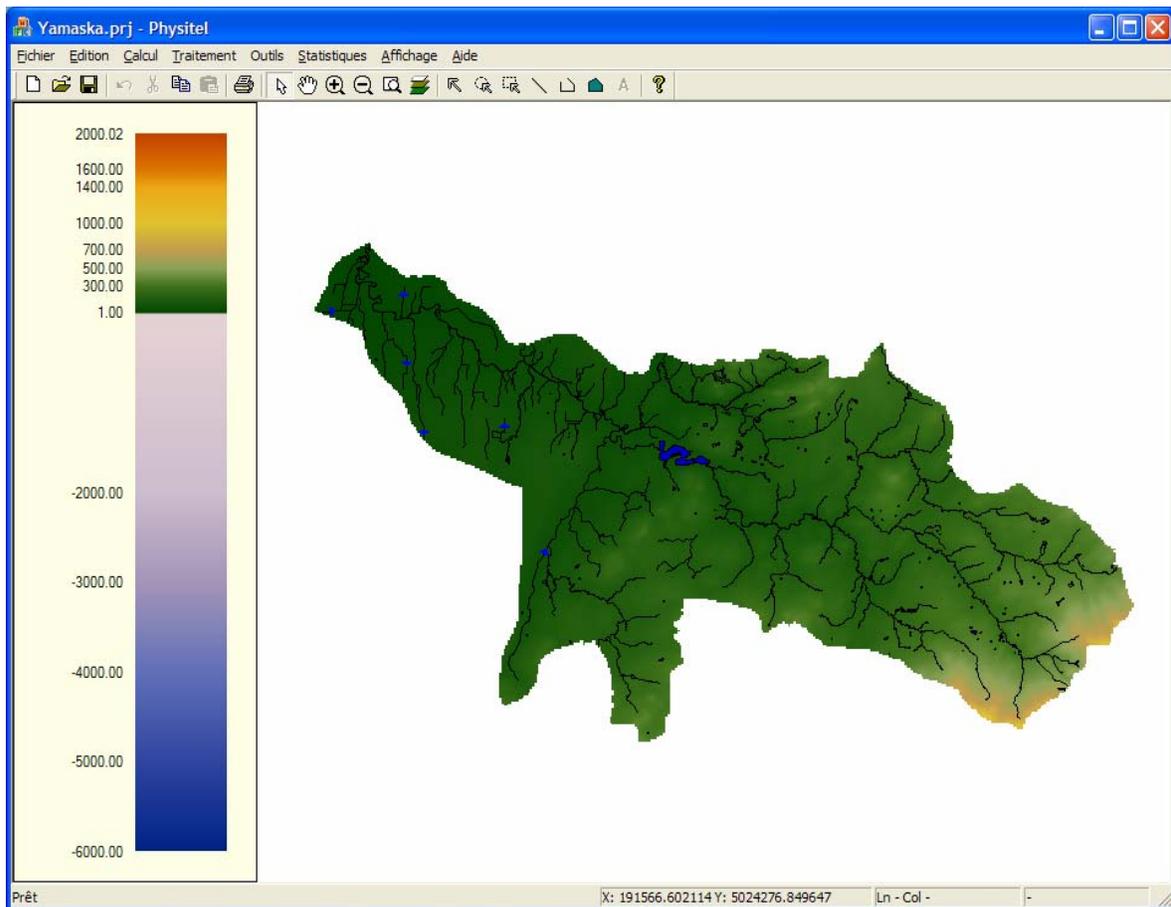


Figure 2.3 : Importation et édition du réseau vectoriel du bassin de la Yamaska

L'édition de la couche vectorielle permet de vérifier la connectivité du réseau hydrographique. Plusieurs outils sont disponibles dans les menus « Traitement » et « Outils » pour permettre l'édition des vecteurs et des régions afin de respecter les règles suivantes :

- (i) les vecteurs lacs ou rivières qui ne sont pas connectés au réseau doivent être supprimés ;
- (ii) les polygones représentant les lacs doivent être converties en régions ;
- (iii) les rivières qui sont représentées par un vecteur rive gauche et rive droite doivent être converties en un seul vecteur ; et

- (iv) le « Test de connectivité » doit inclure tous les vecteurs.

Une fois l'édition du réseau vectoriel terminée, on lance le calcul du réseau matriciel dans le menu « Calcul / Réseau matriciel », tout en identifiant l'exutoire du bassin.

À noter que pour ce projet, la piètre qualité des réseaux des 16 bassins versants à l'étude et temps accordé pour réaliser le projet ont fait en quelque sorte que tous les traitements nécessaires à la vérification de la connectivité ont été réalisés avec les logiciels ArcGIS9.0 (ESRI). L'annexe B de ce rapport présente les étapes de correction des réseaux qui ont été franchies sur les bassins.

2.3. CALCUL DU RÉSEAU MATRICIEL

À cette étape, il n'y a aucun traitement à effectuer. Les rivières sont représentées en bleu plus pâle et les lacs en bleu plus foncé (voir figure 2.4).

2.4. CALCUL DU MNA MODIFIÉ

Les traitements disponibles lors de l'édition du MNA original, sont disponibles pour le MNA modifié. Il est facile de comparer le MNA original avec le MNA modifié en affichant les propriétés dans le menu « Affichage / Propriétés » (voir figure 2.5).

2.5. CALCUL DE LA PENTE

La prochaine étape consiste à calculer les pentes sur le MNE original. Pour ce faire, on exécute le calcul dans le menu « Calcul / Pentes ». Les pentes sont affichées en degré (voir figure 2.6).

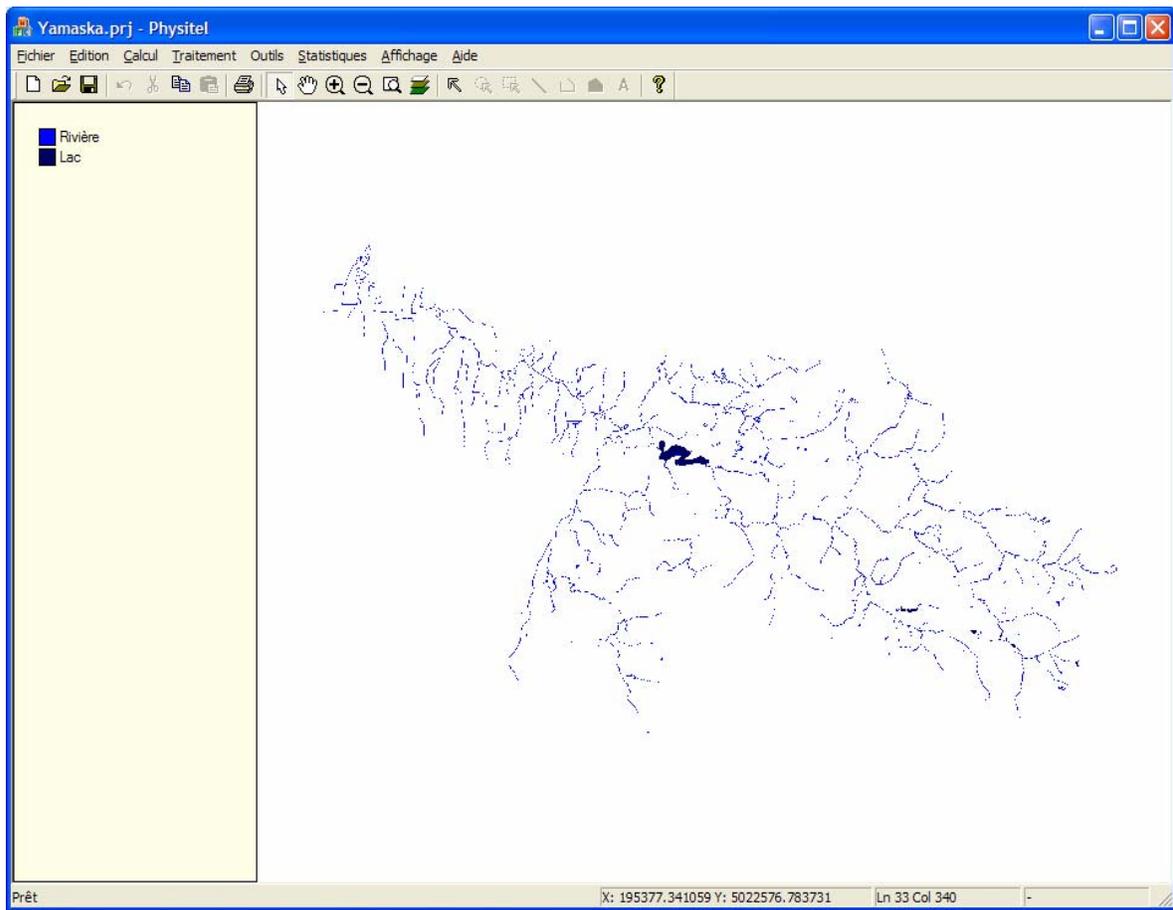


Figure 2.4: Mise en format matriciel du réseau hydrographique vectoriel de la Yamaska

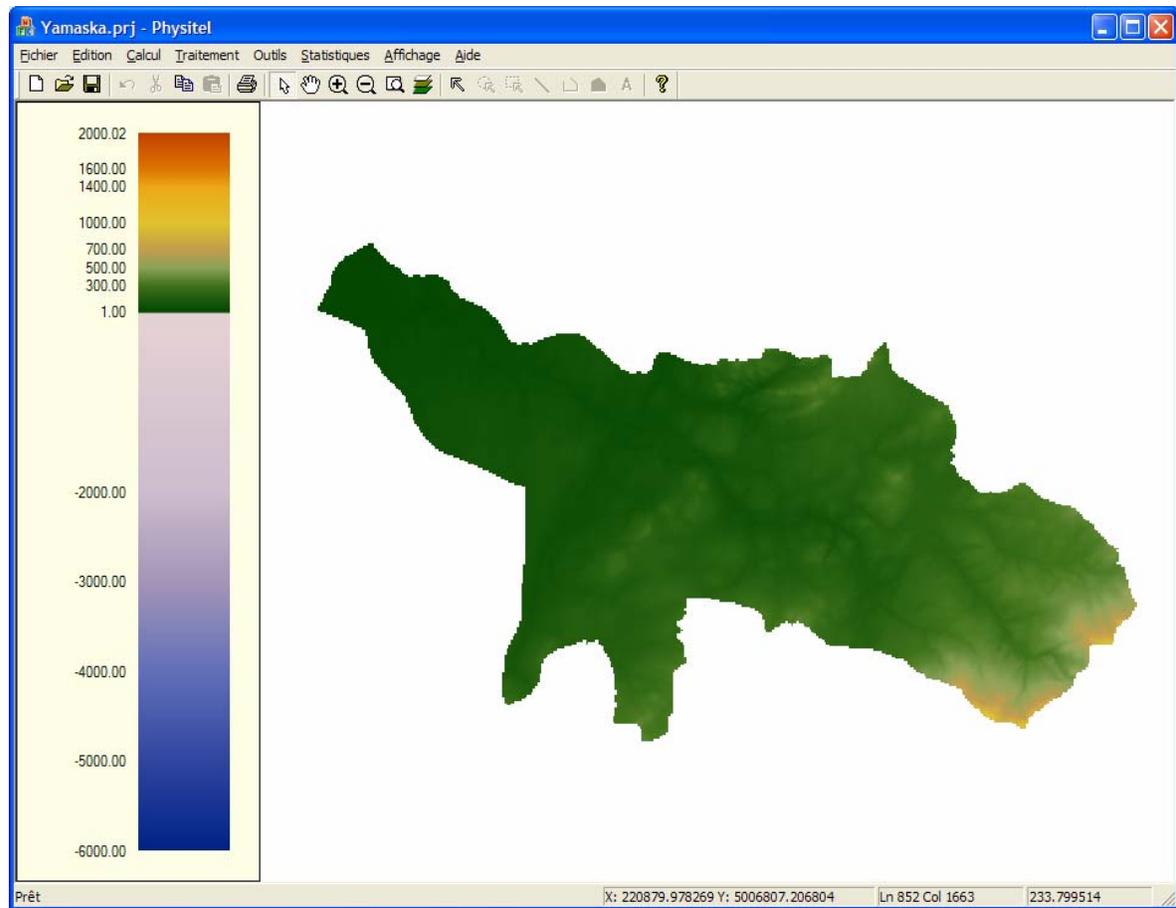


Figure 2.5 : Propriétés du MNA modifié du bassin suite au brûlage du réseau hydrographique

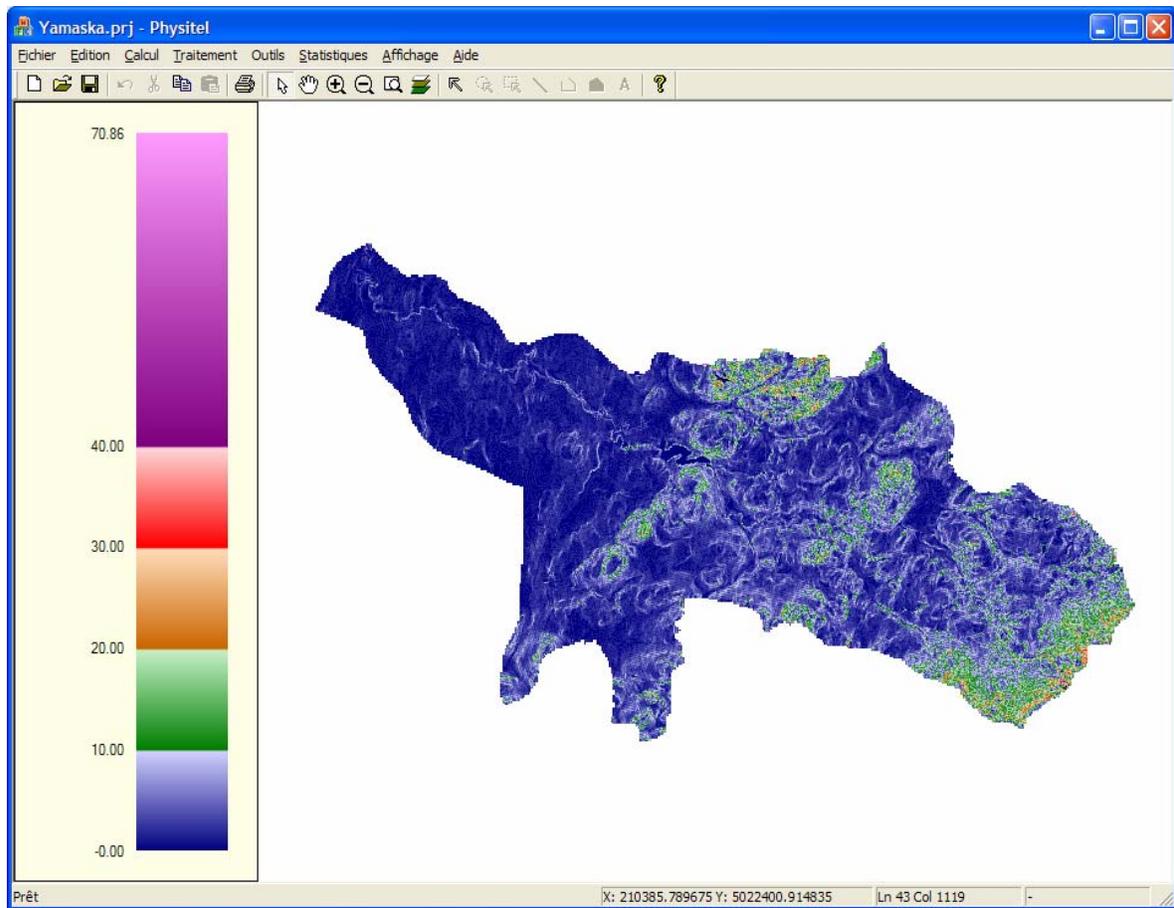


Figure 2.6 : Calcul de la pente du MNA original du bassin de la Yamaska

2.6. CALCUL DES ORIENTATIONS

Encore une fois il n'y a pas de traitement à faire lors de cette étape. Il suffit donc de lancer le calcul des orientations dans le menu « Calcul / Orientations » (voir figure 2.7). Contrairement à la version utilisée pour l'étude présentée à l'annexe A, le calcul des orientations utilise maintenant l'algorithme d'Orlandini *et al.* [2003]. Par ailleurs, celui-ci a été modifié pour permettre l'écoulement vers l'extérieur du MNA afin de découper le bassin versant. Si ce dernier une fois calculé ne correspond pas au bassin versant souhaité, il est très simple de superposer aux orientations le contour du bassin versant (fichier Mapinfo tab) et de l'éditer de façon à corriger le bassin versant calculé par PHYSITEL.

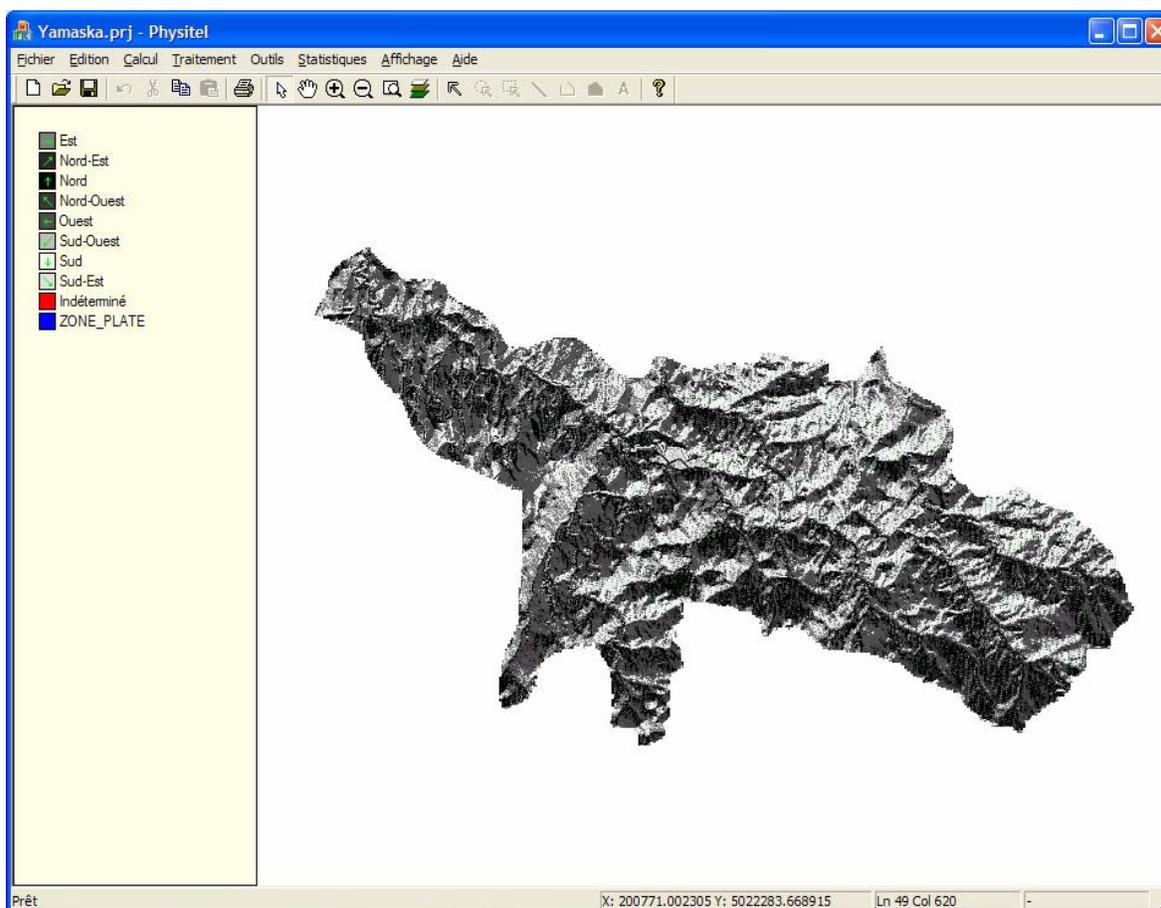


Figure 2.7 : Calcul des orientations du bassin de la Yamaska

2.7. CALCUL DU BASSIN (MATRICE D'ACCUMULATION)

Comme la version utilisée pour calculer l'IT était en cours de développement au moment de réaliser ce projet, l'affichage du bassin ne permettait que de visualiser le masque du bassin calculé par PHYSITEL lors de cette étape (voir figure 2.8). Lors de cette étape, un fichier représentant le contour du bassin versant est aussi créé. Il se retrouve dans le répertoire du projet sous le nom « ContourBassin.tab » au format « Mapinfo tab ».

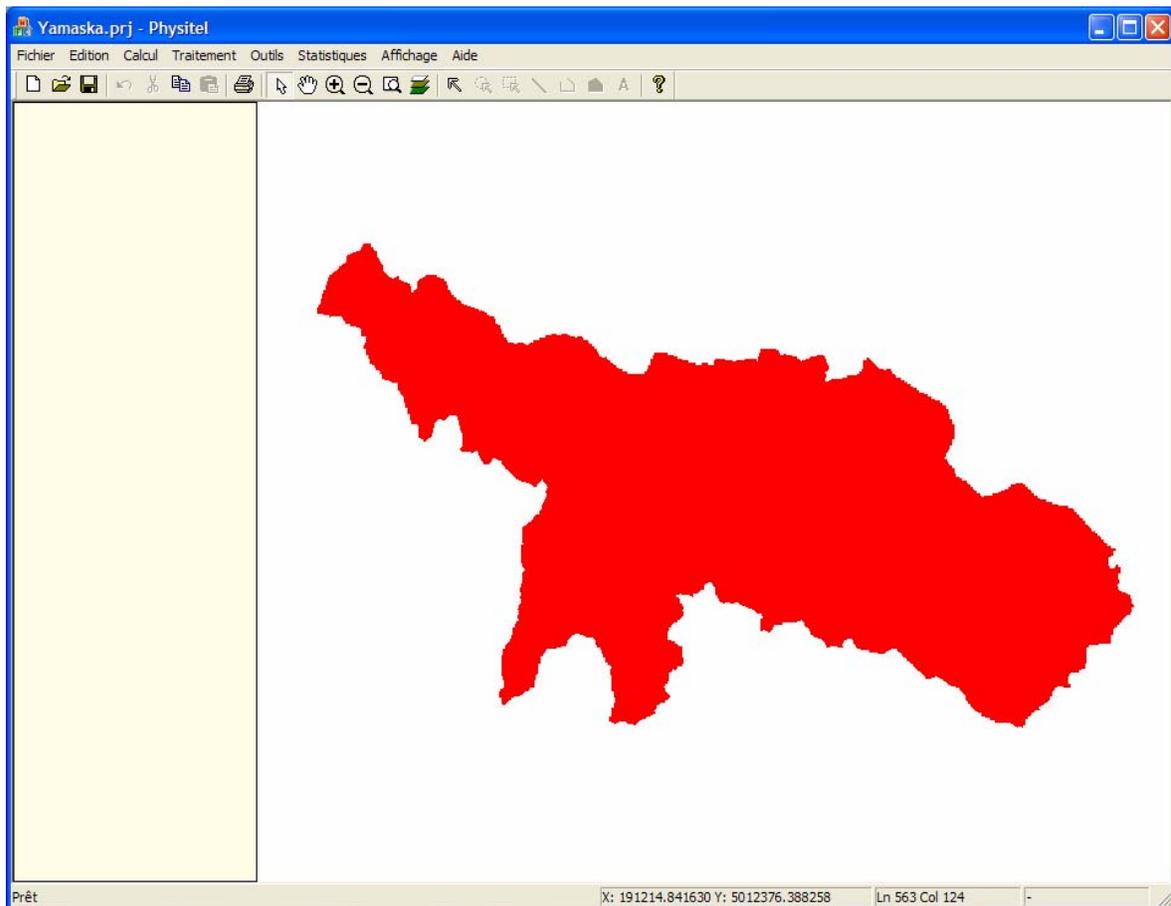


Figure 2.8 : Masque du bassin (matrice d'accumulation) de la Yamaska

2.8. CALCUL DE L'INDICE TOPOGRAPHIQUE

La dernière étape consiste à calculer l'IT. Pour ce faire, on lance le calcul dans le menu « Calcul / Autres / Indice topographique » (voir figure 2.9). Il est à noter que les fichiers de données des projets PHYSITEL sont tous dans le format « Mapinfo tab ». Il est toutefois possible d'exporter tous ces fichiers dans le format « ASCII/Grid » qui est compatible avec la majorité des SIG.

Le calcul des statistiques (minimum, maximum, moyenne, écart type, variance, somme, coefficient d'asymétrie et médiane) est aussi disponible pour la majorité des données calculées par PHYSITEL dans le menu « Statistiques ».

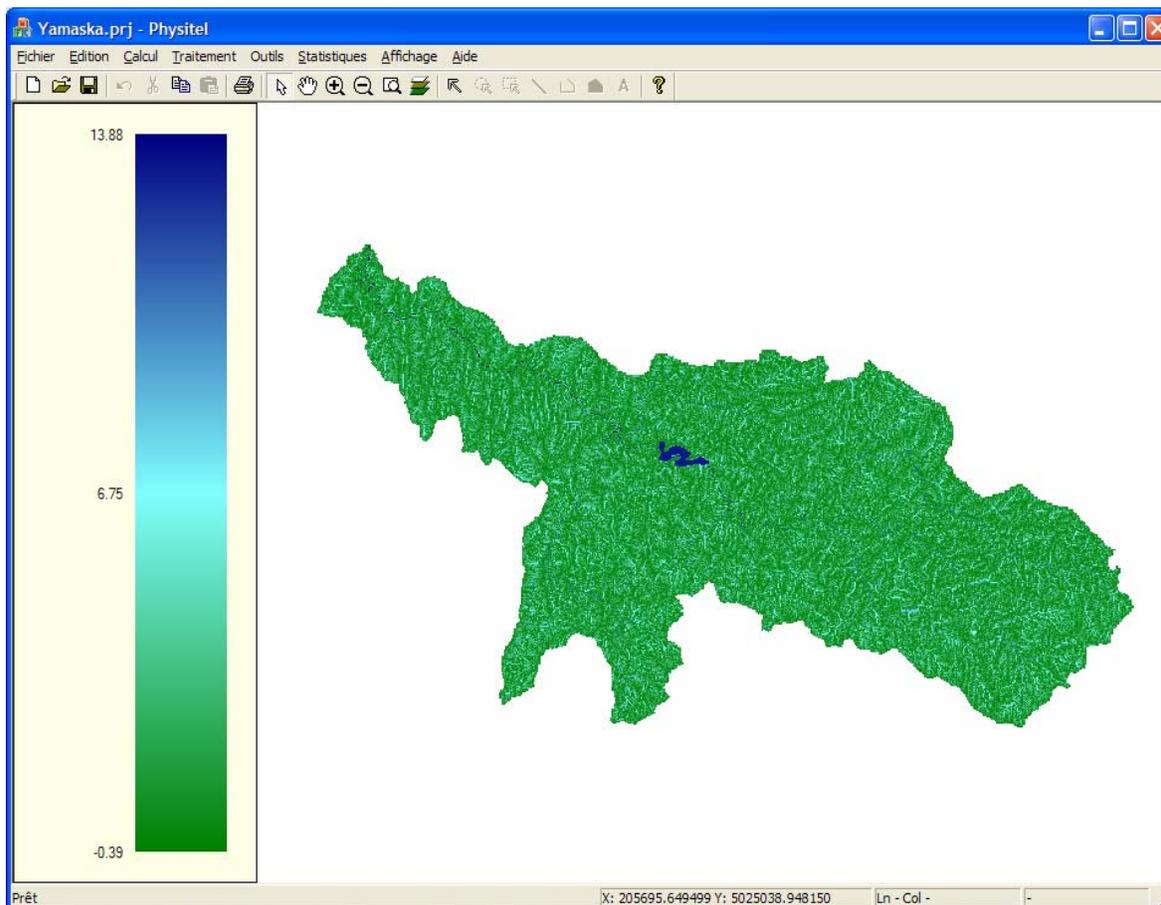


Figure 2.9 : Distribution des valeurs d'IT pour le bassin de la Yamaska

3. RÉSULTATS ET CONCLUSION

Les résultats du calcul de l'IT à l'aide de PHYSITEL (incluant l'algorithme D8-LTD) sont présentés à l'annexe C. On y retrouve pour chaque bassin versant à l'étude une figure qui introduit l'ensemble des données géographiques requises par PHYSITEL, la représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ainsi qu'un tableau résumant les paramètres statistiques de la distribution (minimum, maximum, moyenne, écart type, variance, somme, coefficient d'asymétrie et médiane).

Tel qu'illustré au tableau 3.1, les résultats sont similaires à ceux obtenus suite à l'utilisation de l'algorithme D8-LTD sans attention particulière aux régions planes et aux lacs [Rousseau *et al.*, 2005]. Ceci étant dit, ils ont l'avantage de tenir compte de la réalité de ces régions problématiques. Ceci étant dit, les différences absolues aux niveaux des paramètres statistiques se retrouvent dans les bassins versants où la présence de régions planes et de lacs était notable visuellement, en l'occurrence pour les bassins des rivières Achigan, Boyer, Des Hurons, Etchemin, Mascouche, Nicolet, Saint-esprit et Yamaska, soit huit bassins sur 16. À noter qu'aucun résultat n'est rapporté pour le bassin versant de la Coaticook car ce dernier a été scindé en deux sous-bassins lors de l'utilisation de PHYSITEL.

En ce qui a trait aux différences et/ou similarités entre les distributions des IT des bassins eux-mêmes, celles-ci ont déjà été discutées dans le rapport de Rousseau *et al.*, [2005] et nous en reprenons l'essentiel ici. Ainsi, tous ces bassins versants sont caractérisés par des distributions similaires (similarité des valeurs des paramètres calculés); où l'on retrouve les valeurs minimales près de la ligne de partage des eaux, caractérisée par de petites superficies drainées et des pentes relativement fortes. Quant aux valeurs maximales, elles se manifestent le long du cours d'eau principale et près de l'exutoire.

Tableau 3.1: Comparaison des paramètres statistiques de la distribution des valeurs de PTT sur les bassins versants à l'étude (maximum, minimum, moyenne, médiane, et écart type) obtenus avec PHYSITEL incluant l'algorithme D8-LTD avec ceux obtenus suite à l'utilisation de l'algorithme D8-LTD sans attention particulière aux régions plane et aux lacs.

	Algorithme	Number of pixels	Maximum	Minimum	Moyenne	Médiane	Écart Type
Acadie	PHYSITEL	1253890	14,04	-0,46	1,63	1,10	1,87
	D8-LTD	1435361	14,18	-0,59	1,56	1,10	1,84
Achigan	PHYSITEL	1587443	14,28	-0,64	1,77	1,10	2,28
	D8-LTD	1736236	14,37	-0,81	1,44	0,99	1,86
Des Anglais	PHYSITEL	1269204	14,05	-0,27	1,63	1,10	1,85
	D8-LTD	1315658	14,09	-0,58	1,50	1,05	1,84
Bayonne	PHYSITEL	977741	13,79	-0,63	1,57	1,10	1,85
	D8-LTD	1015629	13,83	-0,90	1,43	0,96	1,87
Beaurivage	PHYSITEL	1863965	14,44	-0,50	1,65	1,09	1,87
	D8-LTD	1974409	14,50	-0,69	1,51	1,05	1,87
Boyer	PHYSITEL	531052	13,18	-0,23	1,72	1,10	1,91
	D8-LTD	589493	13,29	-0,59	1,53	1,05	1,90
Chibouet	PHYSITEL	263935	12,48	-0,24	1,55	1,09	1,84
	D8-LTD	303086	12,62	-0,46	1,50	1,10	1,83
Coaticook	PHYSITEL	-	-	-	-	-	-
	D8-LTD	-	-	-	-	-	-
Des Hurons	PHYSITEL	791222	13,58	-0,37	1,62	1,10	1,85
	D8-LTD	835178	13,64	-0,81	1,49	1,05	1,82
Du Chêne	PHYSITEL	2080617	14,55	-0,30	1,62	1,10	1,88
	D8-LTD	2169346	14,59	-0,79	1,53	1,05	1,88
Etchemin	PHYSITEL	3821500	15,16	-0,32	1,69	1,28	1,91
	D8-LTD	3926981	15,18	-0,92	1,50	1,05	1,87
Mascouche	PHYSITEL	973250	13,78	-0,22	1,63	1,10	1,87
	D8-LTD	1114436	13,92	-0,53	1,53	1,05	1,85
Nicolet	PHYSITEL	4315743	15,28	-0,33	1,67	1,10	1,92
	D8-LTD	4446620	15,31	-0,76	1,51	1,05	1,86
Noire	PHYSITEL	4112112	15,23	-0,36	1,69	1,35	1,83
	D8-LTD	4236437	15,26	-0,85	1,53	1,05	1,86
Saint-Esprit	PHYSITEL	526125	13,17	-0,31	1,63	1,09	1,96
	D8-LTD	598467	13,30	-0,74	1,45	1,00	1,88
Yamaska	PHYSITEL	1070094	13,88	-0,39	1,67	1,10	1,93
	D8-LTD	1116561	13,93	-0,92	1,49	1,05	1,86

4. RÉFÉRENCES

Hentati, A., A.N. Rousseau. (2005) *Computational procedure of the topographic index using PHYSITEL. Rapport de recherche* No R-833. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Sainte-Foy, PQ.

Kirby, M. (1975). Hydrograph modelling strategies. Dans Peel, R., M. Chisholm, P. Haggett (éditeurs) *Processes in Physical and Human Geography*. Heineman, London, pp.69-90.

Pan F., C.D. Peters-Lidard, M.J. Sale, A.W. King. (2004). A comparison of geographical information system-based algorithms for computing the TOPMODEL topographic index. *Water Resources Research*, **40**, W06303.

Quinn, P.F., K. Beven et R. Lamb. (1995). The $\ln(a/\tan\beta)$ index : how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework. *Hydrological Processes*, **9** : 161-182.

Rousseau, A. N., A. Hentati, S. Tremblay, R. Quilbé, J.-P. Villeneuve. (2005). *Computation of the topographic index of 16 watersheds in Quebec. Rapport de recherche* No R-800-f. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Sainte-Foy, PQ.

Royer, A., A.N. Rousseau, S. Savary, J.-P. Fortin, R. Turcotte. (2006). PHYSITEL, un SIG pour la mise en place de modèles hydrologiques. *Deuxième Symposium Ouranos*, 2-3 novembre, 2006. Montréal, QC.

Wolock D.M., G.J. McCabe Jr. (1995). Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL. *Water Resources Research*, **31**(50): 1315-1324

van Bochove, É., G. Thériault, F. Dechmi, A.N. Rousseau, R. Quilbé, M.-L. Leclerc, N. Goussard. (2006). Indicator of risk of water contamination by phosphorus from Canadian agricultural land. *Water, Science & Technology* **53**(2) : 303-310 2006.

**ANNEXE A. COMPUTATIONAL PROCEDURE OF
THE TOPOGRAPHIC INDEX USING
PHYSITEL**

A.1 INTRODUCTION

Three flow direction algorithms were applied on 16 watersheds in Quebec to calculate the Topographic Index [Rousseau *et al.*, 2005]. These algorithms were: D8, D8-LAD and D8-LTD.

In the literature, several studies have shown that the D8 [O'Callaghan and Mark, 1984] as a single flow direction algorithm has limitations. It cannot predict flow divergence because the flow from one cell is restricted only to a single downslope neighbouring cell. On the contrary, the multiple flow direction algorithms allow flow to be distributed to multiple downslope neighbouring cells. However, they have a problem of a high dispersion of flow.

The D8-LAD [Tarboton, 1997] and the D8-LTD [Orlandini *et al.*, 2003] are biflow direction algorithms which is a compromise between the simplicity of the D8 and the multiple flow direction algorithms. These two algorithms are non-dispersive and provide more accuracy in the delineation of the drainage network both over hillslope areas (divergence zones) and along valleys (convergence zones).

From a practical point of view, we have found that the D8 algorithm was more sensitive to the topography of the studied watersheds than the other algorithms. The D8-LAD algorithm generates numerous "NoData" values but bypasses problems inherent to the D8 algorithm. The D8-LTD gave the best results of the Topographic Index (*TI*) distributions on the 16 watersheds. However, flat surfaces, wide rivers and lakes still represent a major obstacle for the computation of flow directions with any of the three algorithms. To solve this problem, the approach developed by Turcotte *et al.* [2001] that was integrated in PHYSITEL will be investigated in this study.

A.2 PHYSITEL SOFTWARE AND TI COMPUTATION

This chapter presents PHYSITEL and various steps required for the generation of the slope and flow accumulation matrices that are necessary for the computation of *TI*.

A.2.1. PHYSITEL

The PHYSITEL software allows for the delineation of a watershed by applying the D8 algorithm on a DEM which is "burnt" according to a Digital River and Lake Network (DRLN) vector map. The implementation of PHYSITEL requires 13 steps. In this study, the focus is only on the first seven steps which deal with the determination of the drainage structure.

A.2.1.1 PHYSITEL approach

A.2.1.1.1 D8 algorithm

The Deterministic-8 Node (grid cell) algorithm (D8) is the earliest and the simplest method for specifying flow directions. It stipulates that flow moves from each grid cell to only one of its nearest orthogonal or diagonal neighbours, and in the direction of the steepest downslope [Saunders, 1999].

The D8 algorithm is inappropriate for the identification of wide segments of a river network, such as those that include lakes. Use of the D8-LAD and the D8-LTD bypasses the limitations inherent to the D8 method [Rousseau *et al.*, 2005] but these two algorithms also do not cope with flat surfaces, wide rivers and lakes.

In order to overcome this problem, Turcotte *et al.* [2001] developed a new method using the DRLN as ancillary data to correct the modelled flow directions.

A.2.1.1.2 The DEM “Burning” using the DRLN

The burning method refers to the process of decreasing grid cells representing a watercourse network to enforce the known drainage structure of a watershed on the flow direction matrix. The DRLN which is used jointly with a DEM shows to the burning algorithm the location of the actual river network. The DRLN takes also into account lakes and hence guides the flow direction algorithm to distinguish between lakes and flat surfaces.

Before applying the burning process, the DRLN needs to be pre-treated. All streams that are large enough to be presented by left and right banks must be replaced by a single arc in the center of the stream and all lakes need to be represented by closed polygons.

The DRLN vector already pre-treated is rasterized. After that, the DEM is altered by burning the surface of the terrain in the vicinity of the DRLN.

A.2.1.2 Determination of the drainage structure by PHYSITEL

With the aim of testing the ability of PHYSITEL to cope with difficult data such as flat areas, wide rivers and lakes, we have selected the Yamaska river watershed. This watershed has a flat topography and a meandering river network that includes lakes.

The first step is the importation of the Yamaska watershed DEM which is based on a square grid with a resolution of 19m by 19m (see Figure A.1).

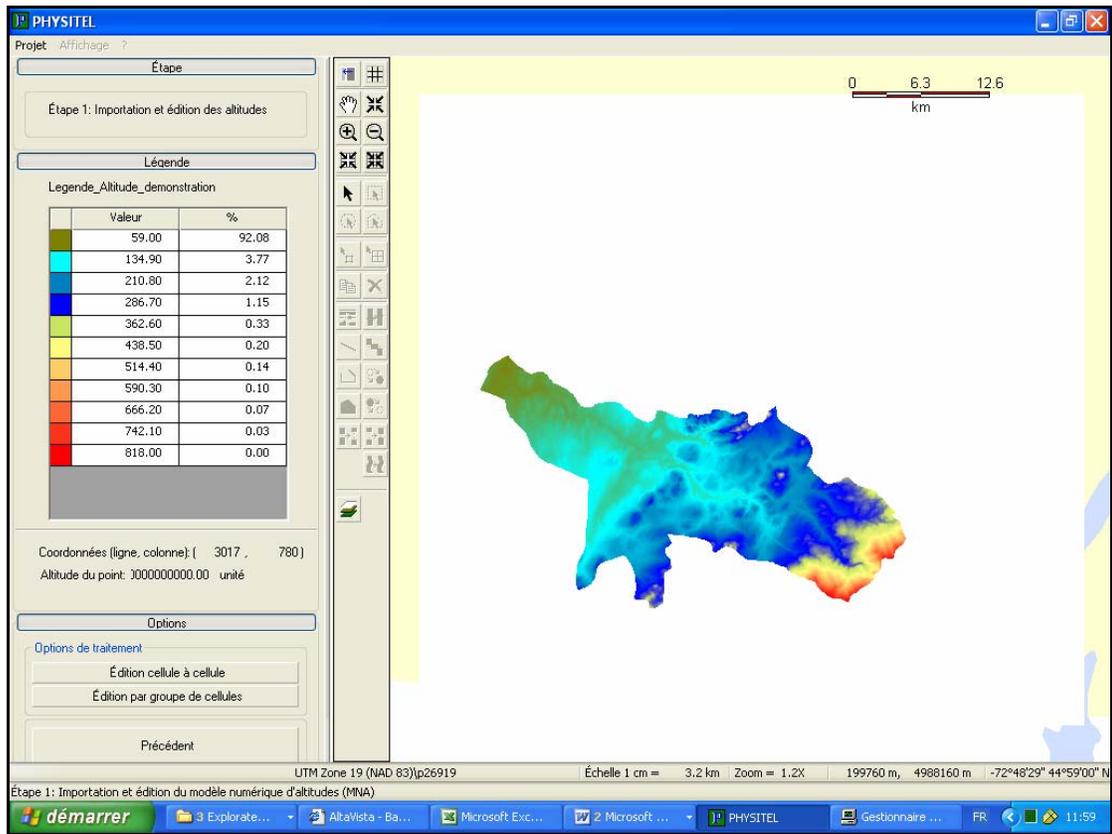


Figure A. 1: Importation and edition of the initial DEM of the Yamaska river watershed.

The dimension of this DEM matrix is 3185 columns \times 3021 rows.

The second step generates a slope matrix (see Figure A.2). For the D8 algorithm, the slope is calculated as follows:

$$slope = 1000 \frac{e_c - e_n}{d_{cn}} \quad (A.1)$$

Where e_c and e_n are respectively elevations of the central cell and its neighbouring cell. d_{cn} is the distance separating the centers of these two cells.

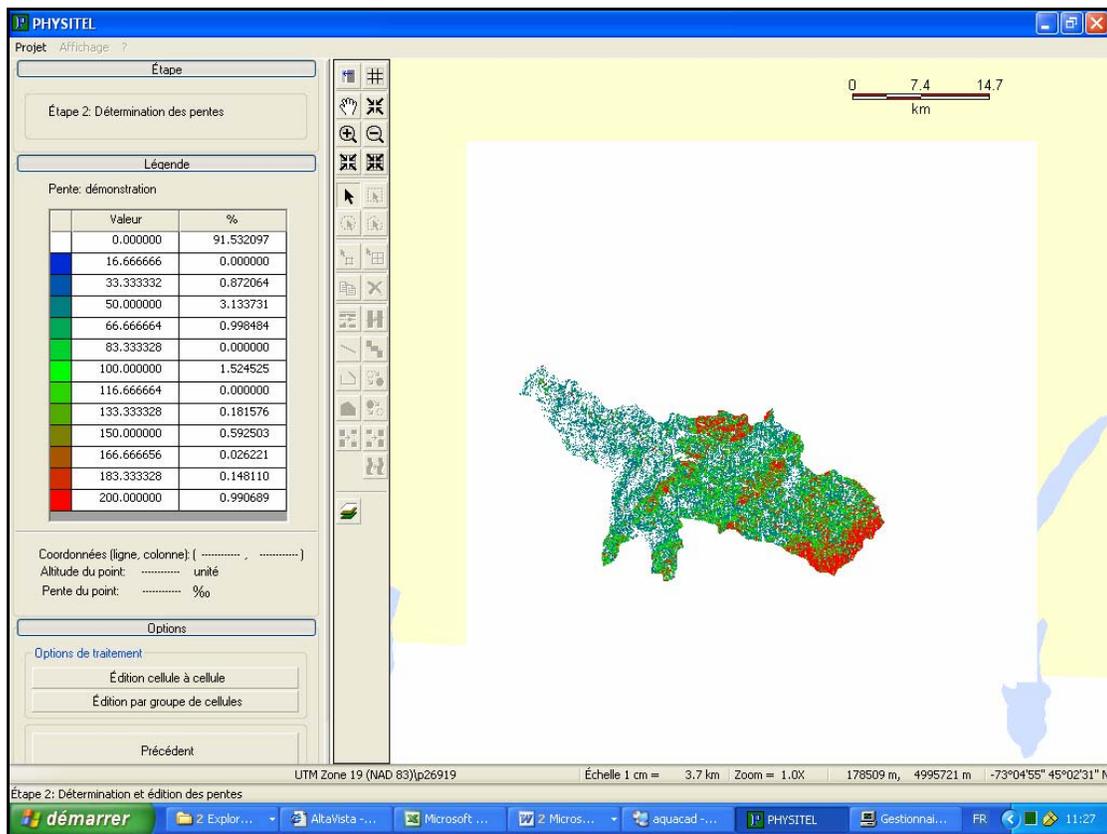


Figure A. 2 : Computation of slope on the original (unaltered) DEM of the Yamaska river watershed.

Step 3 focuses the importation and all functionalities for the edition of the initial DRLN (see Figure A.3). This stage is prior to the rasterization of the DRLN vector map. The DRLN must be pre-treated to create a fully dendritic drainage network. Therefore, the connectivity between all the stream network segments must be ensured.

In order to achieve this task, the following steps must be taken:

- (i) All off-stream network lakes and linear features that are not connected to the stream network have to be removed. It is evident that these lakes and stray stream segments should be without great influence on the drainage structure of the watershed;
- (ii) In-stream lakes must be converted to closed polygons;

- (iii) All streams in the DRLN that have a left and a right bank must be replaced by a single arc in the center of stream. If the river is thinner than the grid resolution it is sufficient to keep one of the two ridge lines of the river;
- (iv) The main stem of the drainage network must extend to the edge of the corresponding DEM. Then, the location of the watershed outlet has to be determined and
- (v) The full connectivity starting from the outlet watershed is achieved.

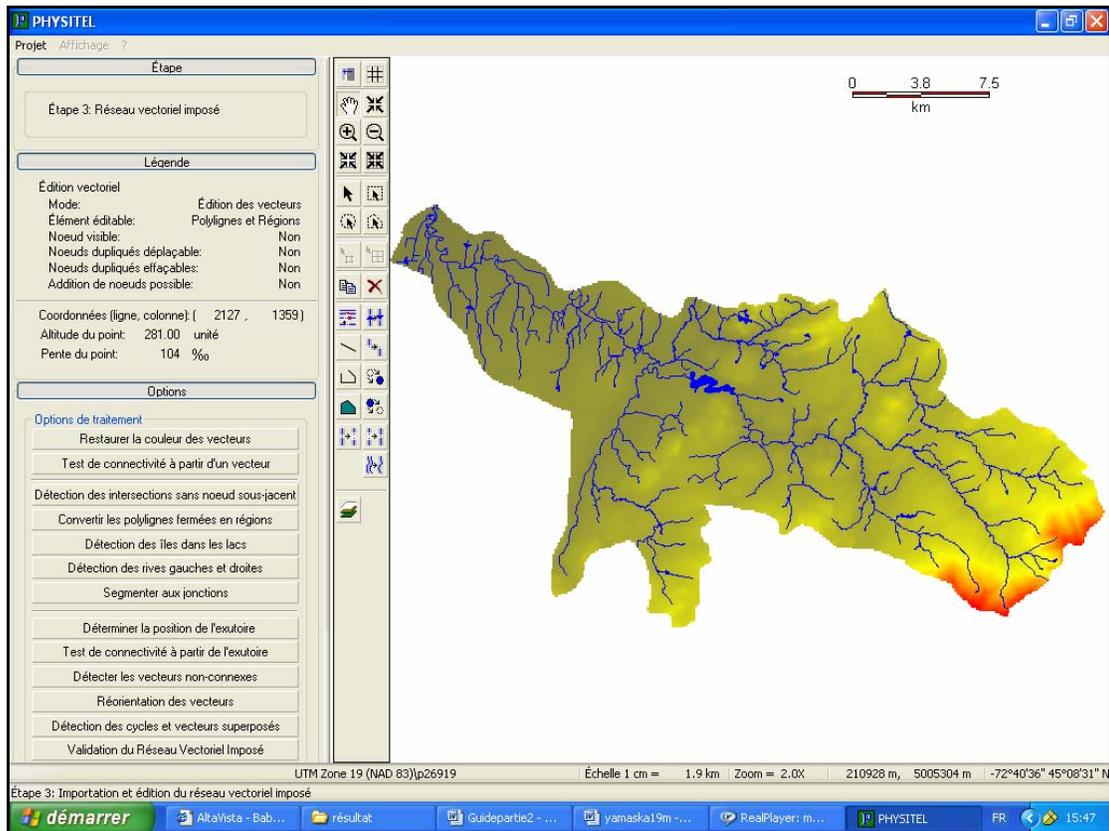


Figure A. 3 : Importation and edition of the DRLN of the Yamaska watershed.

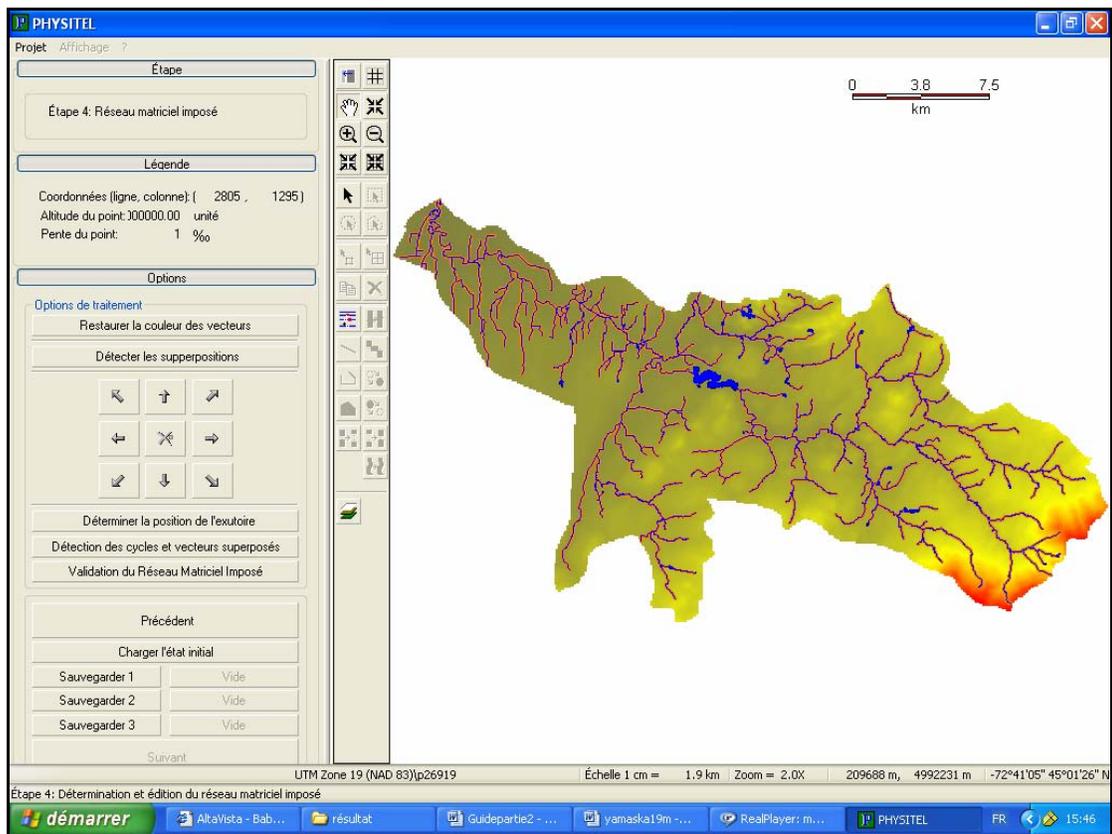


Figure A. 4 : Rasterization and edition of the DRLN of the Yamaska watershed.

Step 4 consists in converting the DRLN vector resulting from step 3 to a raster representation (see Figure A.4).

The DEM “burning” process comes in step 5. This process effectively digs a trench in the DEM following the DRLN (see Figure A.5). This task is done by subtracting a perturbation coefficient from the original elevations of the DEM. Note that, this process is restricted to a buffer zone around the DRLN raster which is determined by a maximum radial influence parameter.

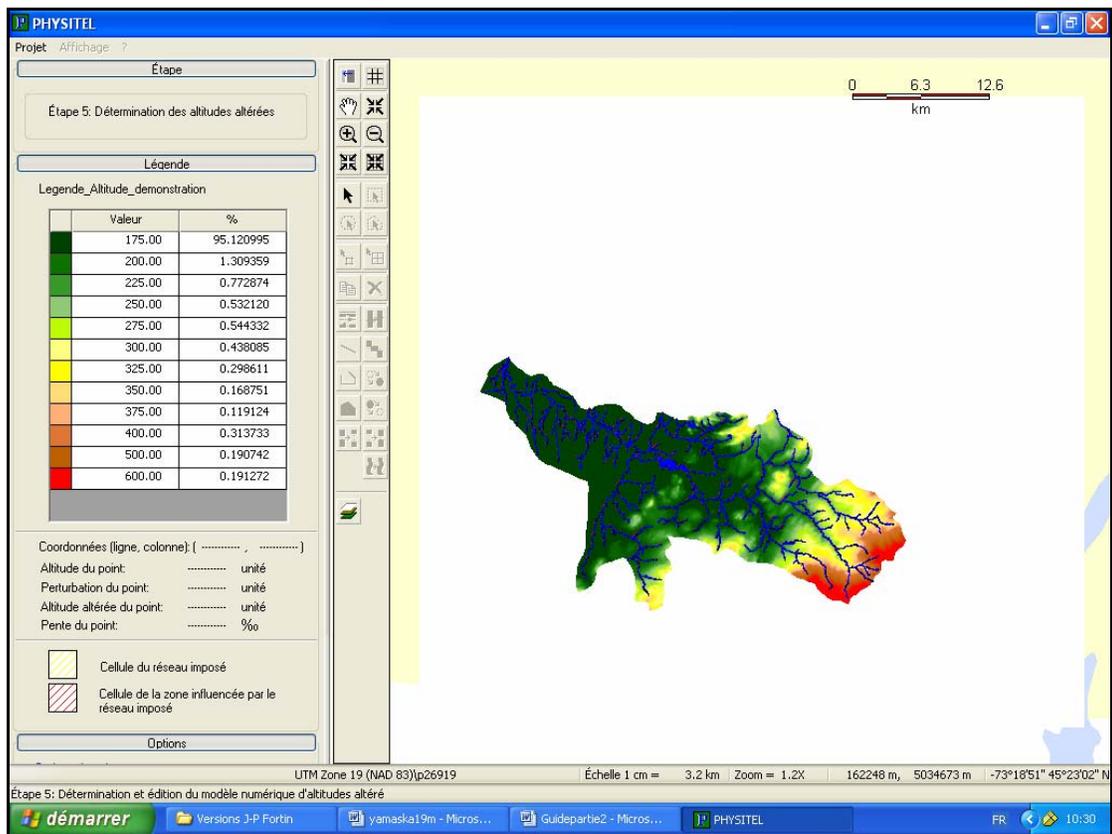


Figure A. 5 : DEM “burning”.

The flow direction matrix is generated in step 6 (see Figure A.6). It is noteworthy that the simulation time of this step and for the Yamaska river watershed (3185 columns \times 3021 rows) took 17.5 hours using a Pentium 4 CPU which has 2.8 Ghz of frequency and 480 Mo of RAM.

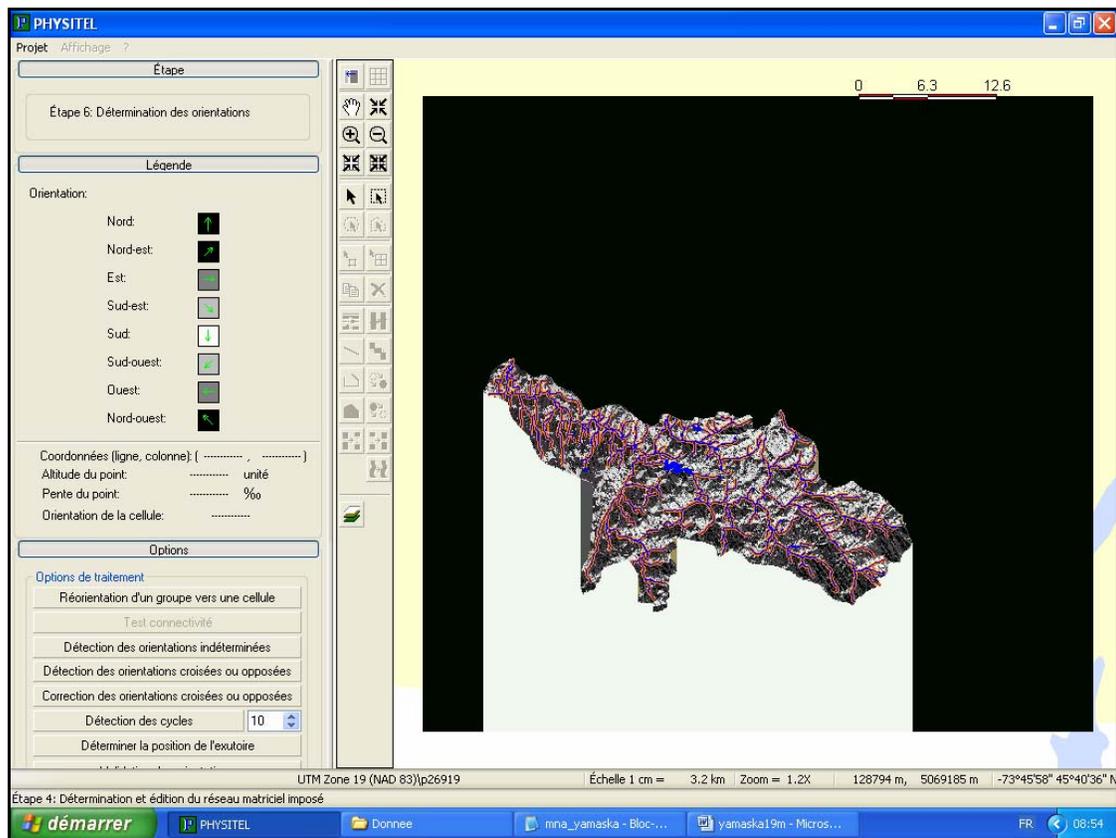


Figure A. 6 : Determination and edition of the flow direction matrix.

Finally, step 7 is dedicated to the generation of the flow accumulation matrix on the basis of the flow direction matrix (see Figure A.7). The upstream of each grid cell is computed by accumulating cells that flow through this given cell. The cells draining an area greater than a specified threshold are considered as defining the river network.

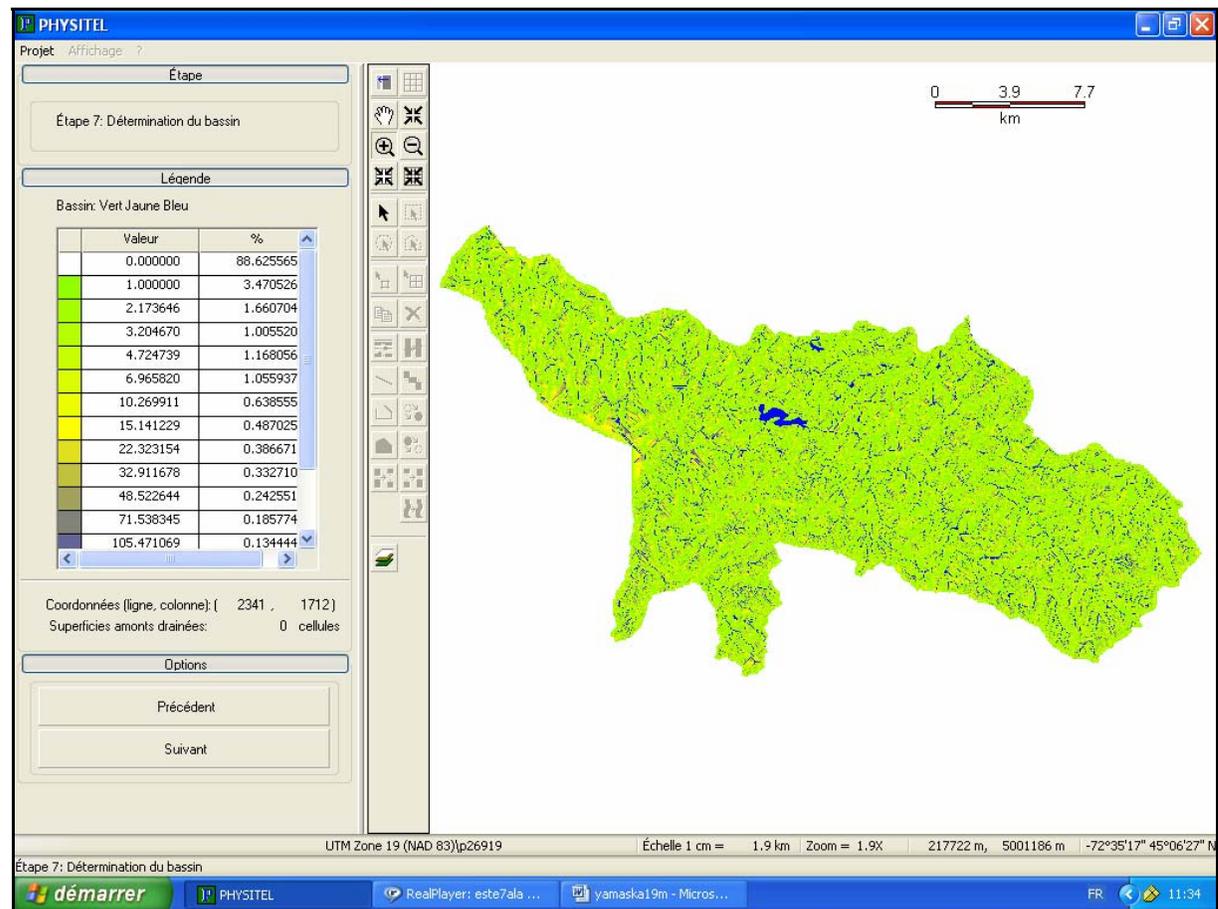


Figure A. 7 : Determination of the flow accumulation matrix.

A.2.2. Calculation of t_i on the yamaska watershed

A.2.2.1 Methodology

The computation of TI distribution is performed by ArcGIS 8.3. Preliminary steps are necessary: The slope and flow accumulation matrices generated by PHYSITEL need to be imported into Arc GIS. This task is done on the basis of the following steps:

- (i) Slope and flow accumulation are generated by PHYSITEL in text files format;
- (ii) Creation of headers to these two files;
- (iii) Replacement of points by commas;
- (iv) Modification of the extension of the Slope and flow accumulation files from .txt to .asc and

(v) Conversion of these two files by Arc Tool Box to grid files format which is compatible with Arc GIS.

Finally, TI is calculated by the “Raster Calculator” window as follows:

$$TI = \ln \left(\frac{[flow_acc] + 1}{\frac{[slp]}{1000} + 1} \right) \quad (A.2)$$

Where, $[flow_acc]$ is the flow accumulation matrix and $[slp]$ is the slope matrix which are generated by the PHYSITEL.

A.2.2.2 Results and discussions

In this study, the TI distribution for the Yamaska watershed was calculated making use of a slope and flow accumulation matrix that are generated by PHYSITEL. This result was compared to the TI distributions calculated in a previous study [Rousseau *et al.*, 2005] by the D8-LTD [Orlandini *et al.*, 2003], D8-LAD [Tarboton, 1997] and D8 [O’callaghan and Mark, 1984] integrated in Arc Hydro Tools (see Figure A.8). The influence of DRLN is clear on the map of TI distribution which is computed by PHYSITEL. In fact, the lakes are successfully simulated within the Yamaska DEM which is burnt following the DRLN.

Regarding wide rivers with two banks, PHYSITEL offers a manual edition of the DRLN so that wide rivers are replaced by a central arc. In the vicinity of the watershed boundary, flat surfaces are sometimes undetermined during the flow direction generation step. However, within the PHYSITEL framework the user can manually assign arrows to cells of flat zones.

Figure A.9 presents histograms of TI distributions for the Yamaska watershed which are obtained by the different algorithms. The histograms which correspond to PHYSITEL and D8-LAD do not contain negative TI values which correspond to high areas not contributing to flow accumulation or when $a < \tan\beta$ (where a is the upslope area per unit contour length and $\tan\beta$ is the slope). If we compare TI distributions as calculated by Arc Hydro Tools and PHYSITEL which only differ by the way the DEM is burnt, the histograms are almost similar with the exception that Arc Hydro generates negative values of TI . But if we cumulate the TI values of $[-2;0[$ and $[0;2[$ classes generated by Arc Hydro we find 70% which is the same value of TI distribution in the $[0;2[$ class using PHYSITEL. This could be explained by the fact that PHYSITEL does not generate zero values in the flow accumulation matrix.

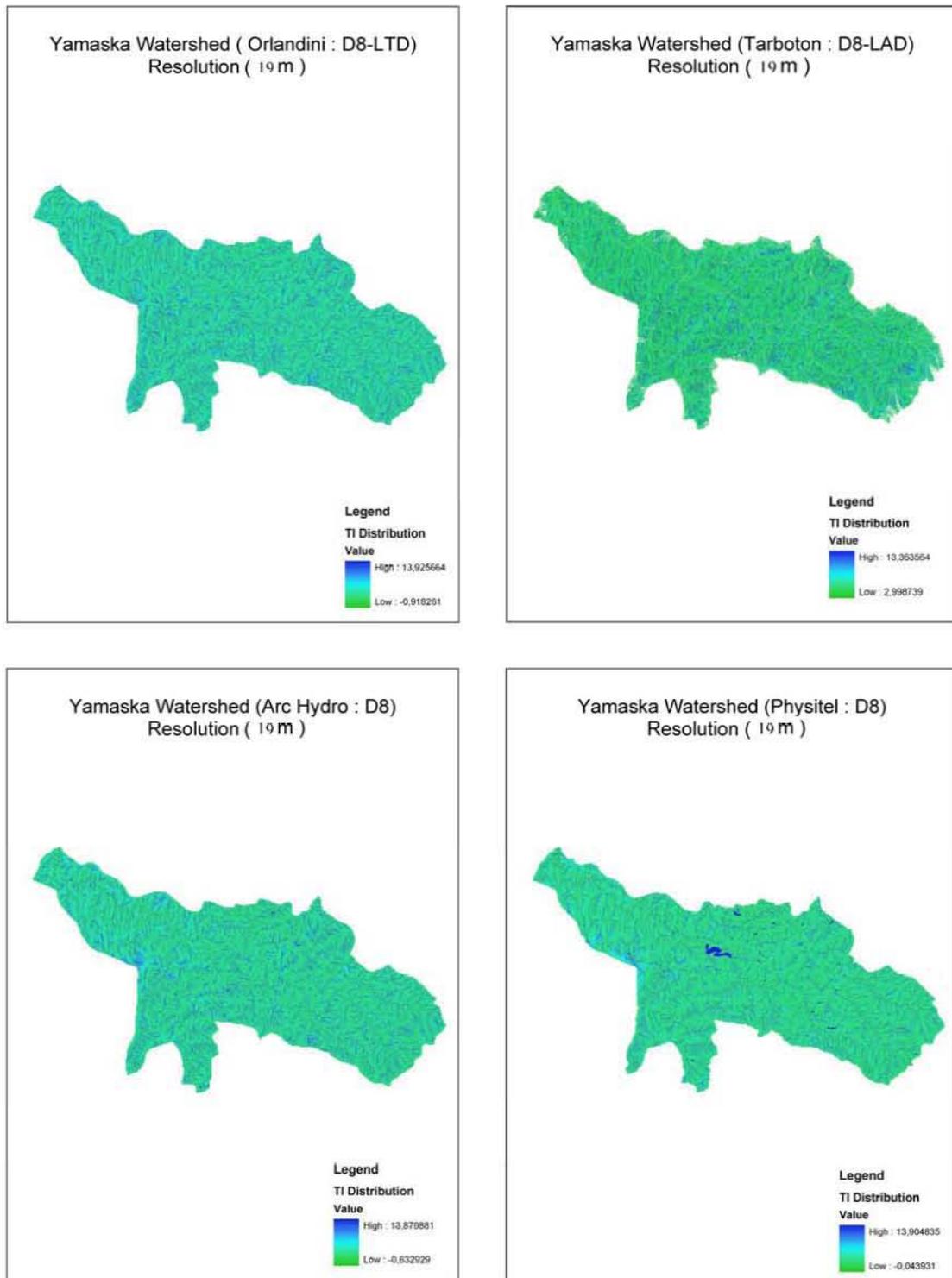


Figure A. 8 : Comparison of *TI* distributions obtained by the D8-LTD, D8-LAD, Arc Hydro (D8) and PHYSITEL (D8) for the Yamaska river watershed (resolution 19m).

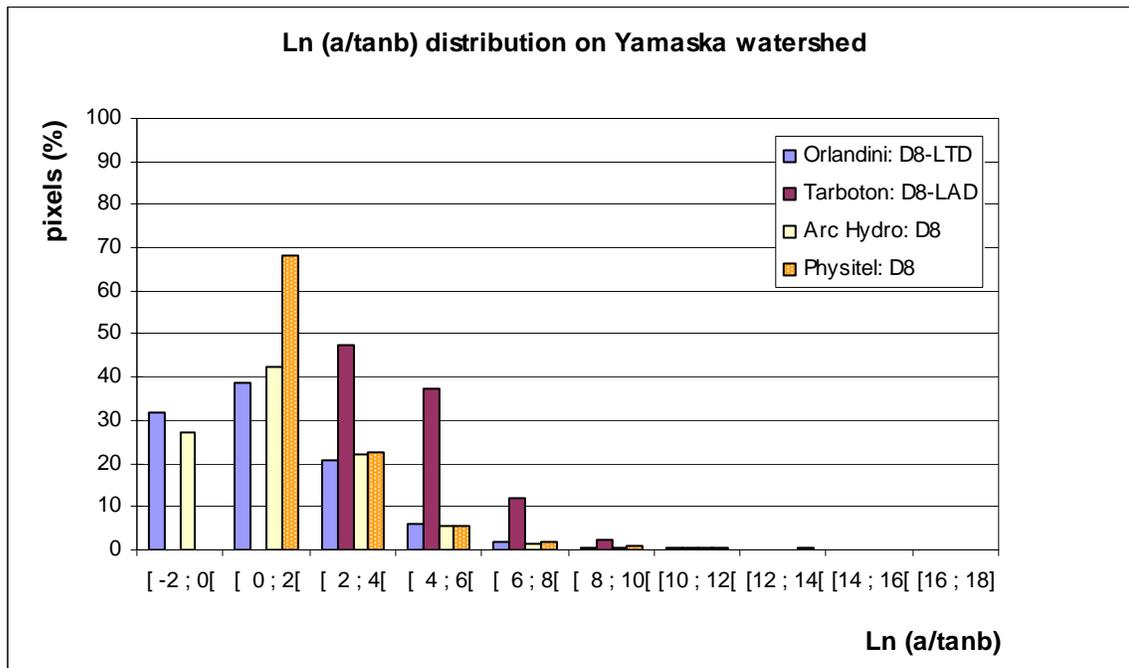


Figure A. 9 : Histograms of TI distributions obtained by the D8-LTD, D8-LAD, D8 of Arc Hydro (D8) and PHYSITEL (D8) on the Yamaska river watershed.

A.3 CONCLUSION

A new procedure for calculating the TI distribution by PHYSITEL was proposed in this study. Results for TI distribution for the Yamaska watershed are satisfactory. The approach of DRLN integrated in PHYSITEL [Turcotte *et al.*, 2001] bypasses the problem associated with the D8-LAD, D8-LTD and Arc Hydro methods which cannot route water through lakes and wide rivers.

Flat surfaces near the watershed boundary still generate problems of flow direction but they can be manually corrected in PHYSITEL. Eventually, it is noteworthy that PHYSITEL requires a long simulation time to generate the flow direction matrix.

A.4 REFERENCES

Rousseau, A.N., A. Hentati, S. Tremblay, R. Quilbé, J.-P. Villeneuve, 2005. Computation of the Topographic Index on 16 watersheds in Quebec. Rapport n  R-800-f. INRS-ETE, 490 de La Couronne, Québec (Qc), Canada.

Saunders, W., 1999. Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. ESRI User Conference, July 24-30, 1999, San Diego, California.

<http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap802/p802.htm>

Tarboton D.G., 1997. A new method for determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, **33**(2): 309-319.

Turcotte R., J.-P. Fortin, A.N. Rousseau, S. Massicotte, J.-P. Villeneuve, 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, **240**: 225-242.

O'Callaghan J.F. and D.M. Mark, 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vis. Graph. Image Process*, **27**: 323-344.

Orlandini S., G. Moretti and M. Franchini, 2003. Path-based methods for the determination of non dispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. *Water Resources Research*, **39**(6), 1144.

**ANNEXE B. ÉTAPES DE VÉRIFICATION DE LA
CONNECTIVITÉ DES RÉSEAUX DES
16 BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE**

B.1 INTRODUCTION

Dans le cadre de ce projet, plusieurs étapes de travail ont été réalisées pour vérifier la connectivité des réseaux à l'étude, c'est-à-dire, vérifier la connectivité d'un réseau hydrique entier au (aux) cours d'eau principal (aux), tout en prenant soin d'effectuer la connexion de ce réseau à une ligne médiane dérivée du (des) cours d'eau principal (aux). Le traitement des données a été effectué à l'aide du logiciel ArcGIS 9.0 (ESRI).

L'objectif ici était de transformer ces lignes en points afin de pouvoir effectuer des calculs sur les coordonnées. Pour s'assurer du bon fonctionnement des calculs, il fallait que ces points soient numérisés dans un ordre séquentiel. Afin d'atteindre les objectifs précis répondant aux besoins initiaux, plusieurs modifications ont dû être apportées à certaines parties des réseaux hydrographiques vectoriels à l'étude. En fait, les vecteurs représentant respectivement chacune des rives des rivières concernées ont dû être retravaillées. Chaque vecteur a dû être « re-numérisé » afin d'en extraire une suite de points séquentiels représentés par leurs coordonnées géographiques respectives. Cette étape est cruciale, puisque l'ensemble des calculs permettant d'extraire la ligne centrale de la rivière se base sur une suite logique de coordonnées géographiques projetées; d'où l'importance d'avoir une table de coordonnées géographiques séquentielles bien structurée.

Le bassin versant « Etchemin » est ici utilisé à titre d'exemple afin de bien illustrer chacune des étapes qui ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS – l'objectif étant de raccorder tous les affluents à la ligne médiane de la (des) rivière(s) principale(s). Ces chaînons manquants ont donc dû être construits en cohérence avec la topographie. Il a fallu ainsi transformer chaque rivière représentée dans le plan vectoriel par deux polygones représentatives des deux rives, en une seule ligne qui devait obligatoirement passer par le centre de la rivière. L'exécution de cette étape était critique puisqu'à notre connaissance générale des SIG, aucune fonctionnalité existante ne permettait au moment de la réalisation de ce projet d'effectuer cette tâche. Afin de la réaliser, un programme développé dans Matlab par Lisa-Marie Pâquet dans le cadre du projet « Frazil », a été adapté au besoin de ce projet. La suite de cette annexe explique les étapes accomplies et la méthode de travail suivie.

B.2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

La méthode utilisée pour effectuer le calcul de la médiane d'un cours d'eau s'appuie sur plusieurs fonctionnalités existantes qu'offrent le logiciel ArcGIS, ainsi que sur des concepts utilisés dans l'élaboration du programme de Lisa-Marie Pâquet dans l'environnement Matlab. Pour ce faire, la solution envisagée consiste à extraire la ligne médiane de la rivière à l'aide des lignes représentant les rives de celle-ci. La ligne dérivée à l'aide du programme d'extraction de ligne centrale contient une quantité de détails variant selon la densité des fichiers de points délimitant les rives qui ont été utilisés dès le départ. Plus les fichiers de points représentant les rives sont denses, plus la ligne centrale sera détaillée. Ligne médiane dérivée doit être aussi fidèle que possible aux lignes de rives, mais tout en gardant une certaine généralité. La figure suivante présente deux exemples de cours d'eau dans lesquels il existe un besoin de tracer une ligne médiane.

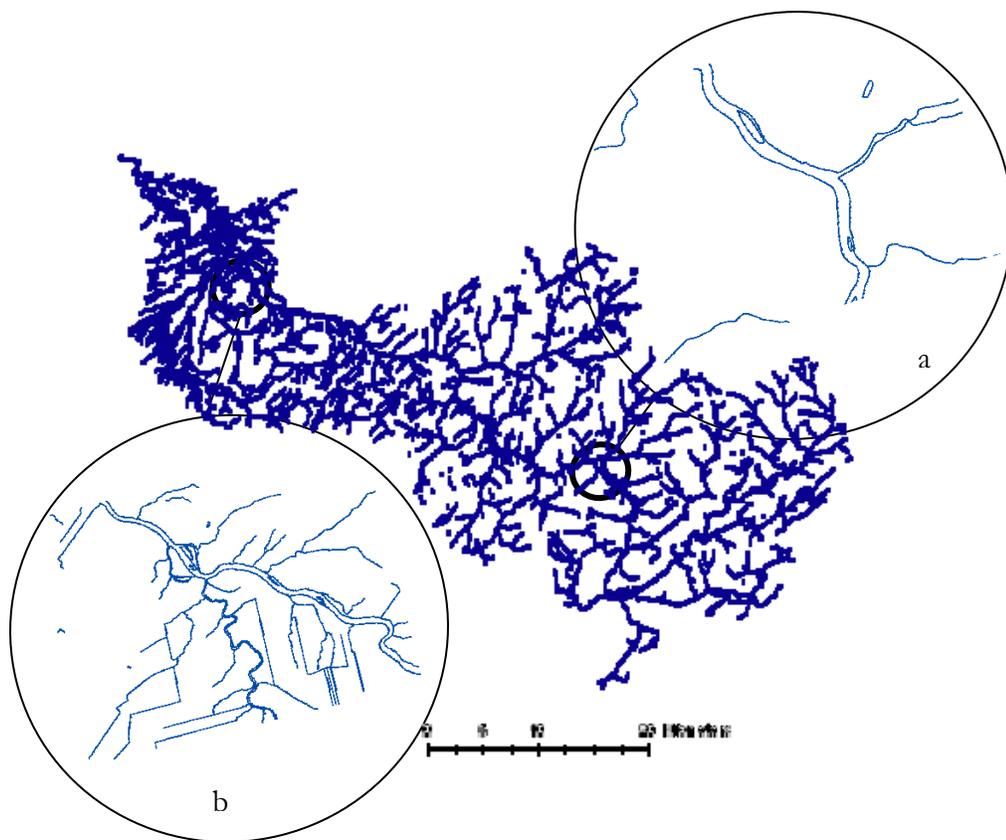


Figure B. 1 : Le bassin versant de la rivière Etchemin : (a) cours d'eau représenté par deux rives et (b) cours d'eau débouchant sur un autre cours d'eau.

B.3 PRÉPARATION DES FICHIERS

Plusieurs manipulations ont été effectuées tout au long du processus de formation des sections homogènes sur les rivières. Les premiers fichiers utilisés sont les fichiers des rives. Ces fichiers servent à dériver l'information ponctuelle que renferment les droites représentant les rives.

B.3.1. Première étape: Isoler chaque rive dans un « Shape file » »

Les fichiers des rives sont utilisés afin de dériver l'information ponctuelle des droites. En fait, les rives se retrouvent habituellement dans un seul fichier « Shape file ». Pour les besoins actuels, les deux rives doivent se retrouver sur deux fichiers séparés. Les fichiers sont séparés et renommés afin d'obtenir deux fichiers pour chaque rive isolée (figure B.2).

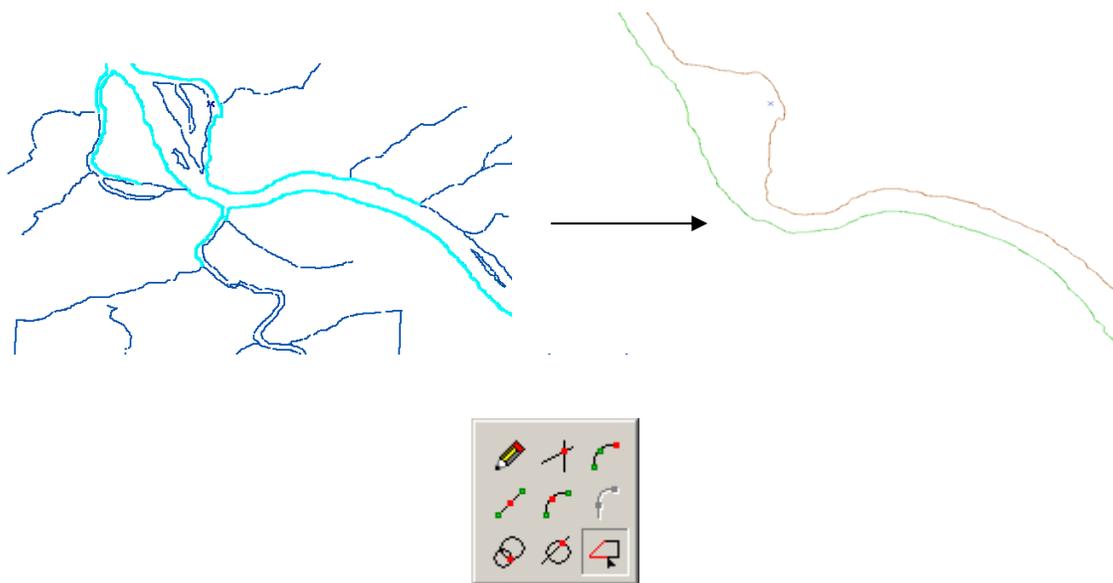


Figure B. 2 Numérisation des rives du cours d'eau à l'aide de l'outil de numérisation du menu EDITOR d'ArcGIS (encart) et enregistrement dans un « Shape file » »

B.3.2. Deuxième étape: Segmentation des rives

Une fois que la segmentation est effectuée, il est important de vérifier que la numérisation des vertex ait été effectuée dans un bon ordre; c'est-à-dire de l'amont vers l'aval en gardant une suite logique entre les identifiants uniques et l'ordre de la géométrie.

Par la suite, nous avons divisé la ligne en vertex, à l'aide de l'outil « divise » du menu d'Édition. La quantité de points dépend du besoin principal. Dans le présent exemple, les divisions ont été placées à chaque 3 m, distance jugée acceptable après avoir mesuré la longueur du cours d'eau.

Une fois la ligne divisée, chaque nœud, de chaque rive, a été enregistré dans un tableau sous format « .txt ». Les deux fichiers « .txt » représentant chaque rive permettent de reconstituer les corridors fluviaux par une seule, au lieu de deux lignes (voir figure B.3).

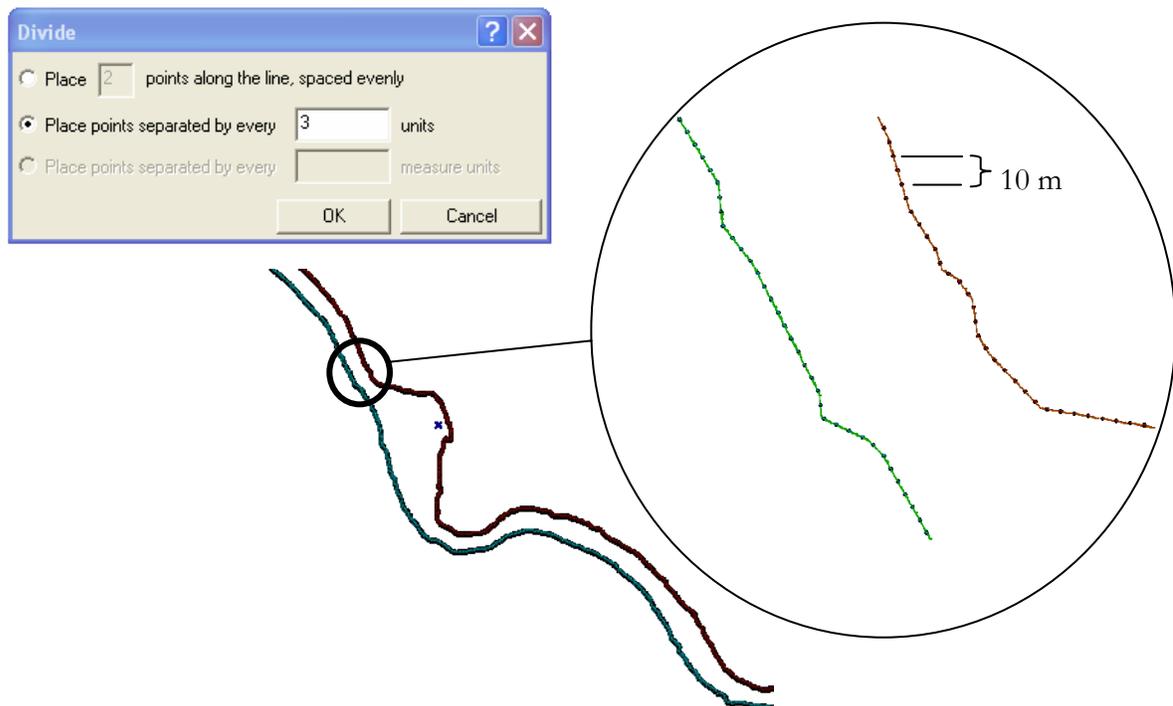


Figure B. 3 Division des deux rives en plusieurs segments de 5 m de distance à l'aide de l'outil « divise » du menu d'Édition d'ArcGIS (encart)

B.3.3. Troisième étape: Affichage du résultat du calcul de la médiane

Les résultats du calcul de la médiane fait à l'aide du programme sur Matlab sont importés dans ArcGIS et apparaissent sous forme de points reliés à son voisin par une vecteur. En utilisant la fonction « point to polyline », on enregistre le fichier sous format « Shape file » et on obtient la médiane du cours d'eau qu'on ramène au fichier de départ (voir figure B.4).

B.3.4. Quatrième étape: Suppression des deux rives des cours d'eau

Une fois la médiane affichée, on supprime les deux rives pour garder juste la ligne centrale (figure B.5), qu'on montre sur le bassin versant.

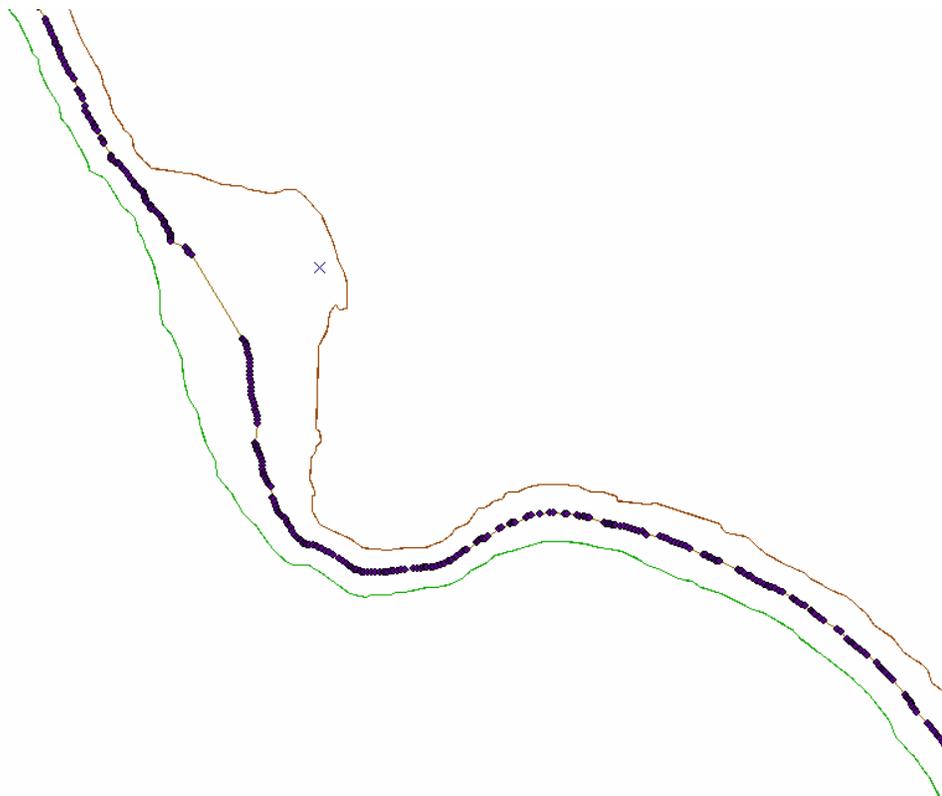


Figure B. 4 Transformation des points de la médiane en ligne

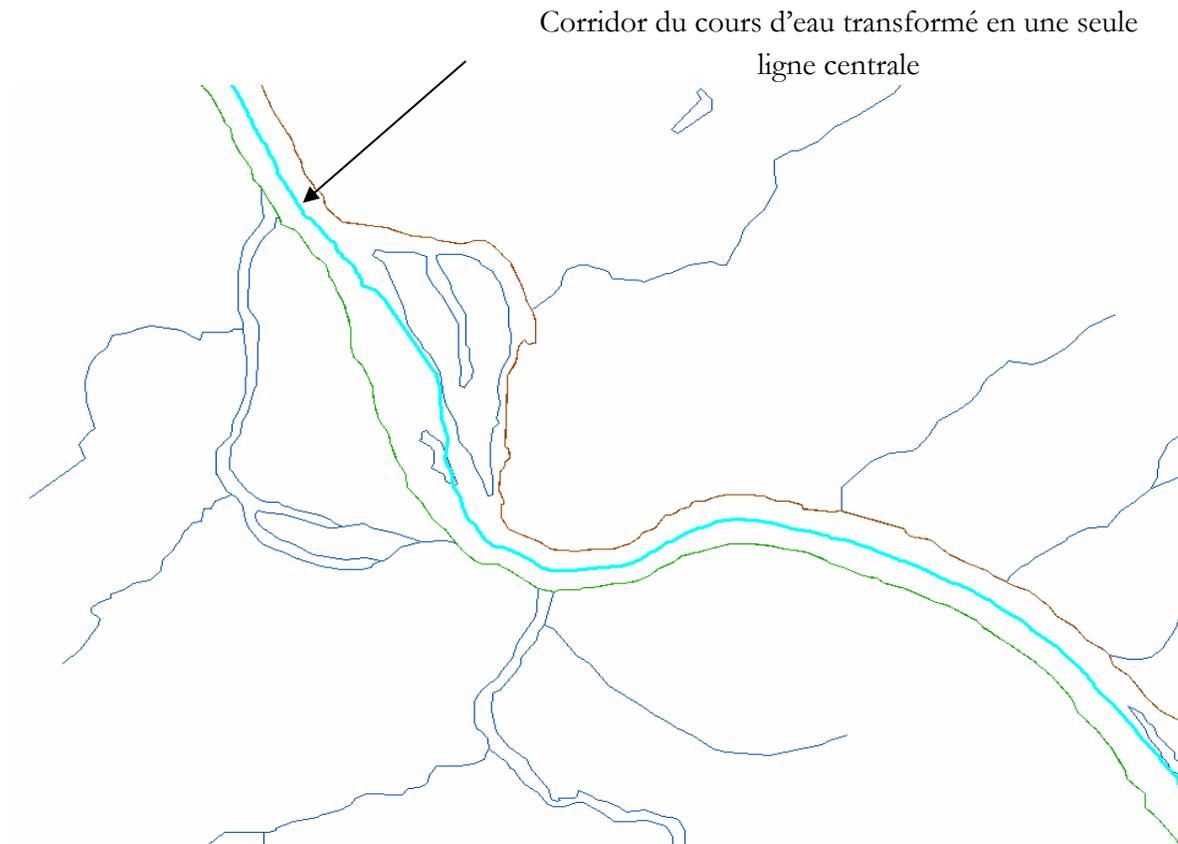


Figure B. 5 Résultat du calcul de la médiane du cours d'eau

B.3.5. Cinquième étape: Connexion des affluents au cours d'eau

Pour relier les affluents aux nouveaux cours d'eau désormais dépourvus de leurs deux rives, mais aussi pour s'assurer que les réseaux hydrographiques sont correctement fermés ou connectés, on applique la règle de topologie. La topologie de réseau décrit la relation entre des ensembles linéaires (polylignes) par leurs extrémités, c'est-à-dire les nœuds. Chaque segment ou arc possède un nœud de départ et un nœud d'arrivée, permettant de connaître la relation entre deux arcs, ainsi que son sens (figure B.6). A partir de ces éléments nous pouvons calculer des itinéraires, des zones d'attractivité. Le format vectoriel connecté peut être obtenu avec le logiciel ArcGIS qui fournit des fonctions pour relier les chaînes connectées (opérateurs de type «extend et trim » fonctions qui permettent d'aller attacher la ligne sans modifier son

orientation) à des nœuds communs. Ce mode supporte directement la notion topologique de connectivité et est donc suffisant pour modéliser des réseaux hydrographiques.

B.4 REMARQUE

À noter que même si, une fois les données préparées, le calcul de la ligne médiane des cours d'eau se fait d'une manière automatique, le résultat obtenu doit être sujet à une révision adéquate de la part de l'exécuteur. En effet, des anomalies ont été relevées au niveau de certains endroits des cours d'eau où il s'avère compliqué pour le programme de calculer la médiane entre les deux rives. Par exemple aux endroits où on retrouve des îles irrégulières ou aux endroits où la rivière diverge d'une manière asymétrique (voir figure B.7). On voit qu'il n'y a pas de points calculés à l'endroit où il y a une irrégularité importante de spécifier que l'algorithme n'est pas encore assez autonome pour contourner toutes les petites subtilités de la géométrie d'un cours.

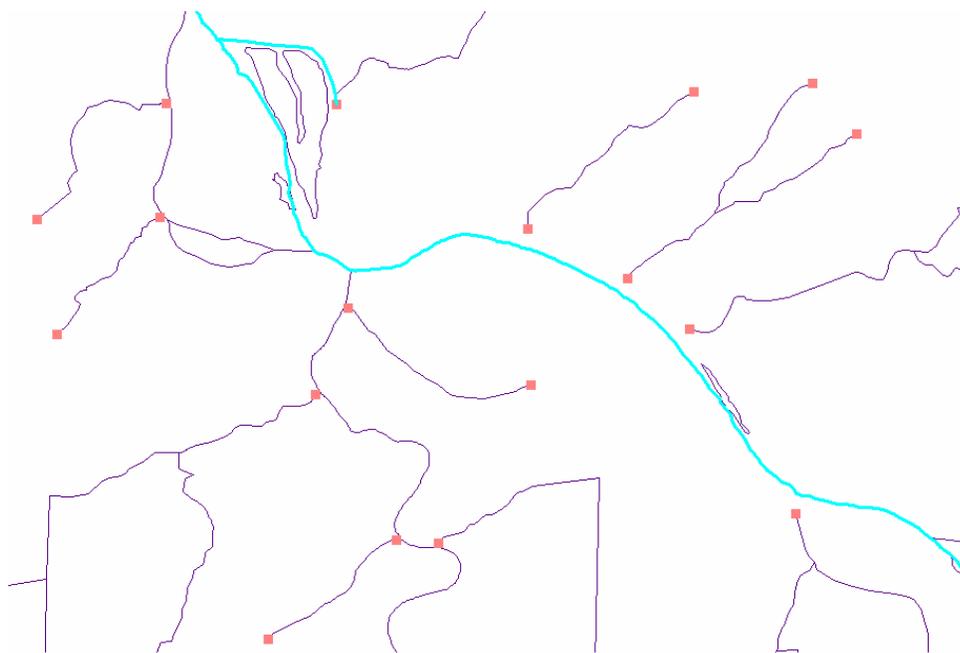


Figure B. 6 L'application de la règle de topologie pour la connexion du réseau hydrographique

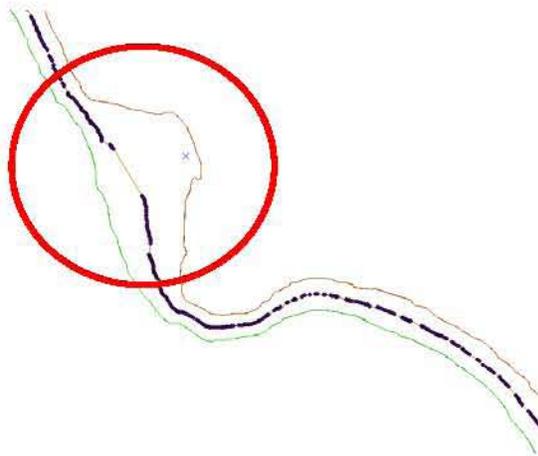
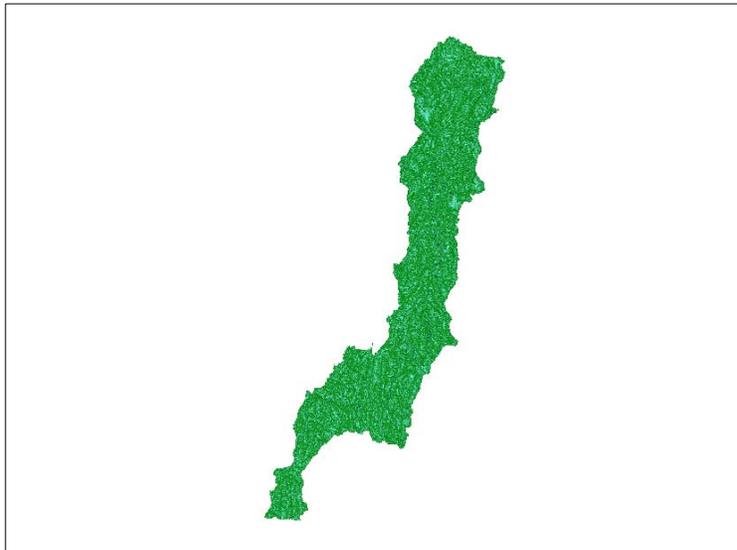


Figure B. 7 Exemple d'anomalie : zone de divergence de la rivière

**ANNEXE C. DISTRIBUTION CARTOGRAPHIQUE
DE L'IT POUR CHACUN DES 16
BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE**



(c)

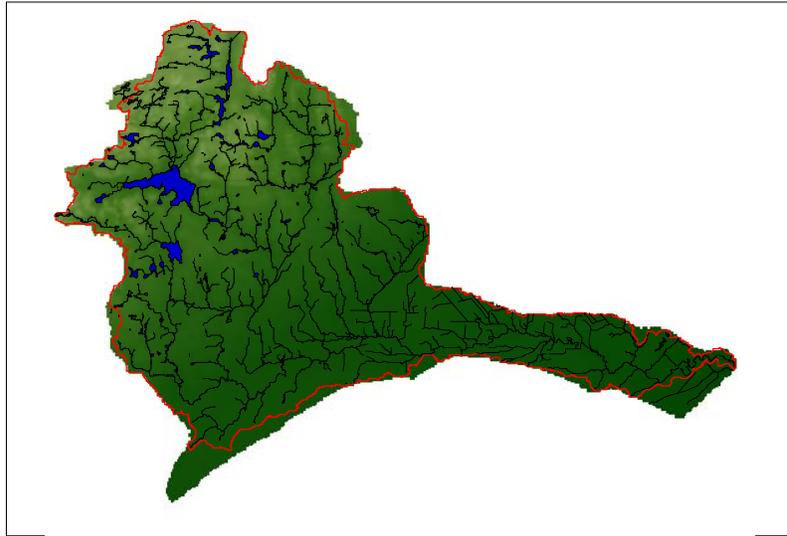


(b)

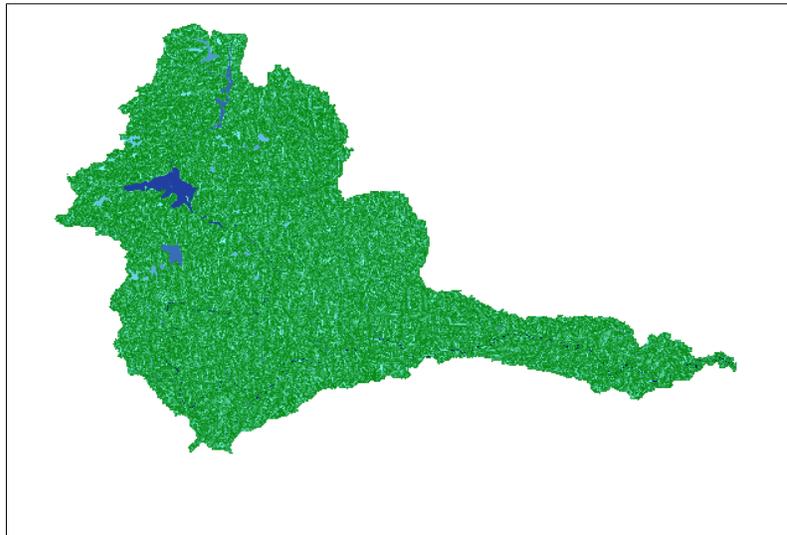
Nombre total de valeurs	1253890	Distribution des valeurs		
Maximum	14,04			
Minimum	-0,46	Nombre de classes	10	
Somme	2038188,57	Longueur des classes	2,00	
Moyenne	1,63			
Médiane	1,10	[-2.00 - 0.00[	144411	11.52%
Variance	3,52	[0.00 - 2.00[	705678	56.28%
Écart type	1,87	[2.00 - 4.00[	287644	22.94%
		[4.00 - 6.00[	79391	6.33%
		[6.00 - 8.00[	19557	1.56%
		[8.00 - 10.00[	9998	0.80%
		[10.00 - 12.00[	3207	0.26%
		[12.00 - 14.00[	3847	0.31%
		[14.00 - 16.00[	157	0.01%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 1 Bassin versant de la rivière Acadie : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

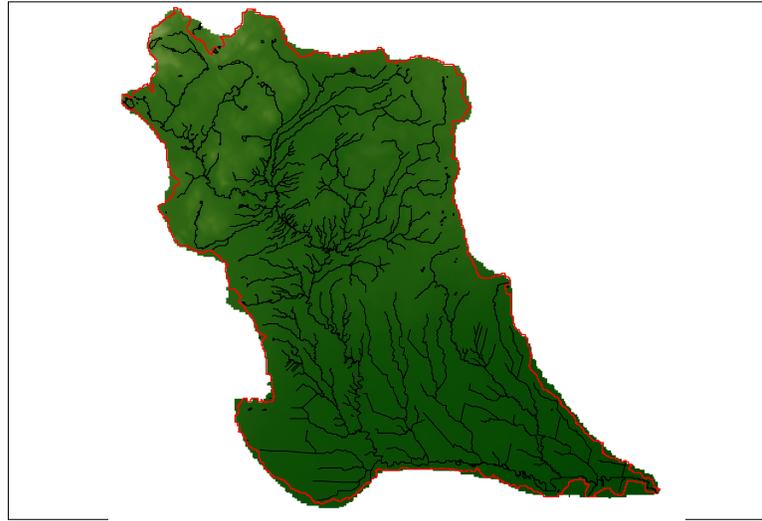


(b)

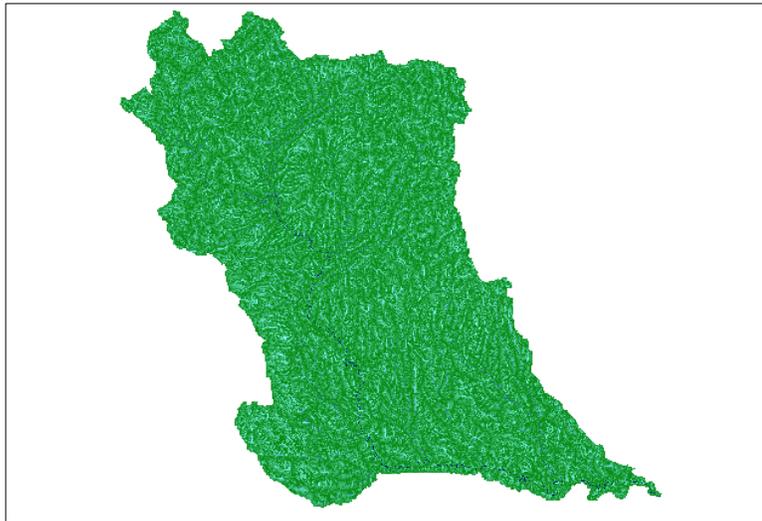
Nombre total de valeurs	1587443	Distribution des valeurs			
Maximum	14,28	Nombre de classes 10			
Minimum	-0,64	Longueur des classes 2,00			
Somme	2808905,70				
Moyenne	1,77	[-2.00 - 0.00[	351445	22.14%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	722137	45.49%
Variance	5,22	[2.00 - 4.00[	353726	22.28%
Écart type	2,28	[4.00 - 6.00[	80951	5.10%
		[6.00 - 8.00[	26038	1.64%
		[8.00 - 10.00[	21705	1.37%
		[10.00 - 12.00[	11223	0.71%
		[12.00 - 14.00[	18695	1.18%
		[14.00 - 16.00[	1523	0.10%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%	

(a)

Figure C. 2 Bassin versant de la rivière Achigan : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

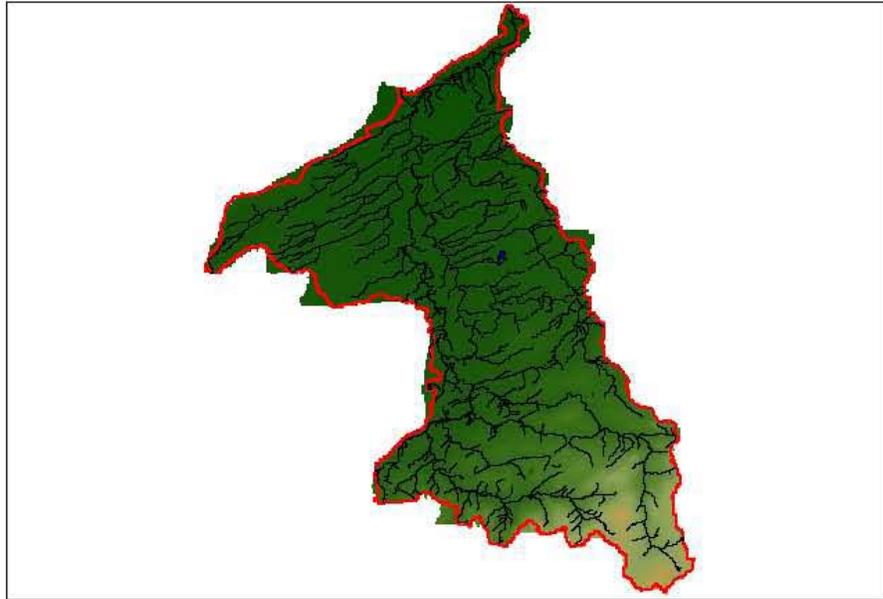


(b)

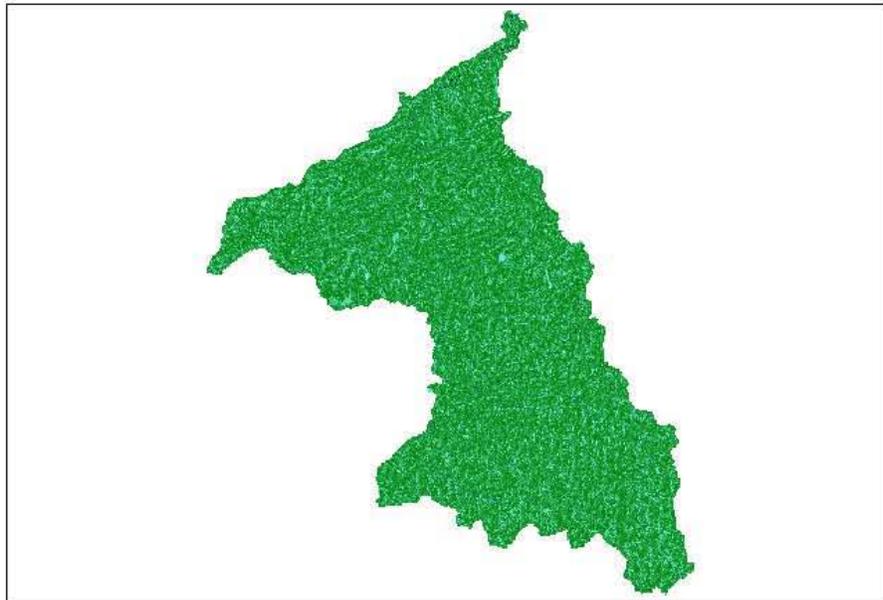
Nombre total de valeurs	977741	Distribution des valeurs		
Maximum	13,79	Nombre de classes	10	
Minimum	-0,63	Longueur des classes	2,00	
Somme	1538373,95			
Moyenne	1,57	[-2.00 - 0.00[	290457	29.71%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	384912	39.37%
Variance	3,41	[2.00 - 4.00[	222866	22.79%
Écart type	1,85	[4.00 - 6.00[	49318	5.04%
		[6.00 - 8.00[	15223	1.56%
		[8.00 - 10.00[	9105	0.93%
		[10.00 - 12.00[	3739	0.38%
		[12.00 - 14.00[	2121	0.22%
		[14.00 - 16.00[	0	0.00%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 3 Bassin versant de la rivière Bayonne : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

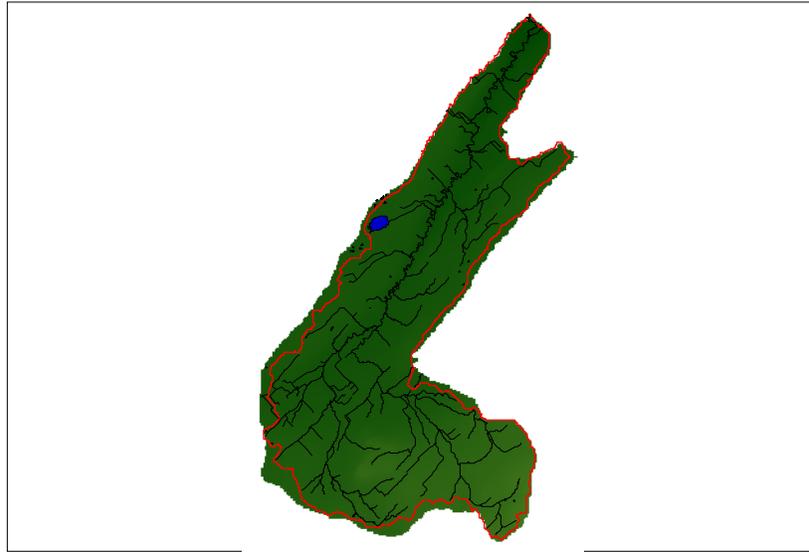


(b)

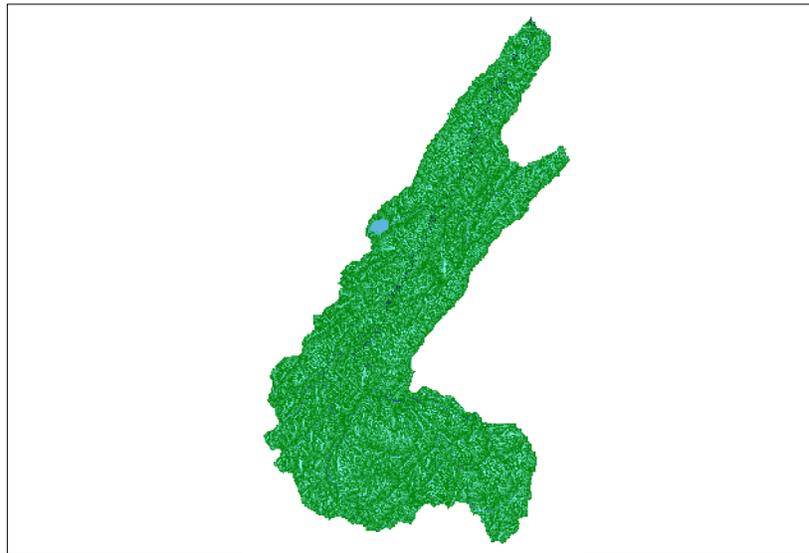
Nombre total de valeurs	1863965	Distribution des valeurs			
Maximum	14,44	Nombre de classes	10		
Minimum	-0,50	Longueur des classes	2,00		
Somme	2994107,97				
Moyenne	1,61	[-2.00 - 0.00[	575581	30.88%	
Médiane	1,09	[0.00 - 2.00[	692343	37.14%	
Variance	3,51	[2.00 - 4.00[	417128	22.38%	
Écart type	1,87	[4.00 - 6.00[	127178	6.82%	
		[6.00 - 8.00[	28760	1.54%	
		[8.00 - 10.00[	12058	0.65%	
		[10.00 - 12.00[	6448	0.35%	
		[12.00 - 14.00[	3139	0.17%	
		[14.00 - 16.00[	1330	0.07%	
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%	

(a)

Figure C. 4 Bassin versant de la rivière Beaurivage : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

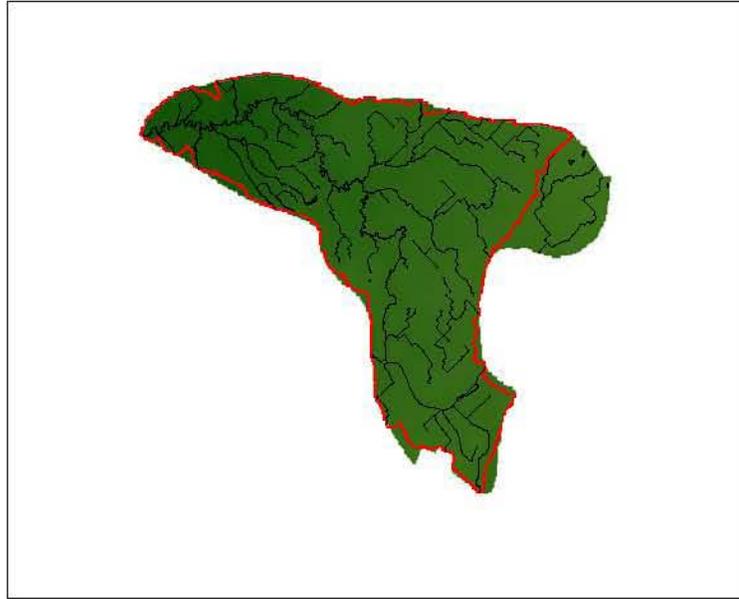


(b)

Nombre total de valeurs	531052	Distribution des valeurs		
Maximum	13,18	Nombre de classes	10	
Minimum	-0,23	Longueur des classes	2,00	
Somme	911881,68			
Moyenne	1,72	[-2.00 - 0.00[	113512	21.37%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	236277	44.49%
Variance	3,63	[2.00 - 4.00[	124014	23.35%
Écart type	1,91	[4.00 - 6.00[	40257	7.58%
		[6.00 - 8.00[	9008	1.70%
		[8.00 - 10.00[	4927	0.93%
		[10.00 - 12.00[	1646	0.31%
		[12.00 - 14.00[	1411	0.27%
		[14.00 - 16.00[	0	0.00%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 5 Bassin versant de la rivière Boyer : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

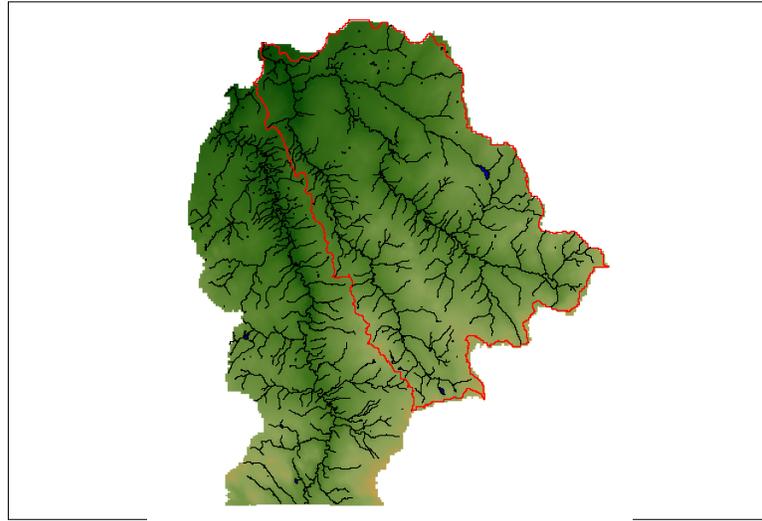


(b)

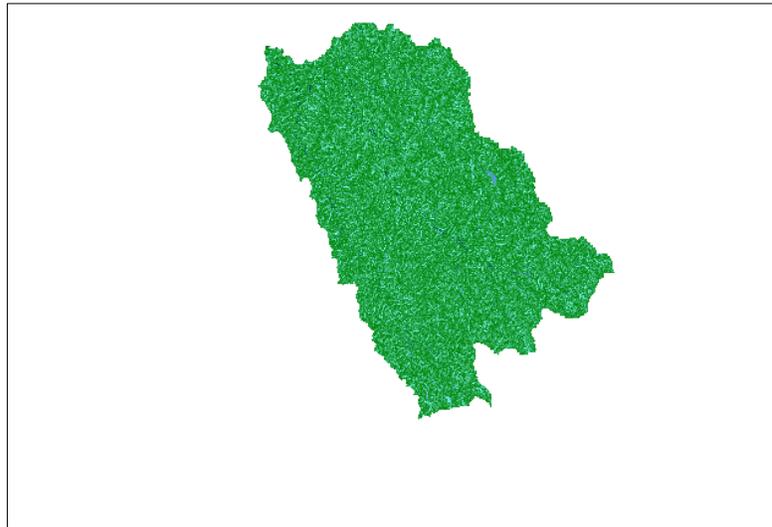
Nombre total de valeurs	263935	Distribution des valeurs			
Maximum	12,48	Nombre de classes	10		
Minimum	-0,24	Longueur des classes	2,00		
Somme	408590,87	[-2.00 - 0.00[	85038	32.22%	
Moyenne	1,55	[0.00 - 2.00[	99168	37.57%	
Médiane	1,09	[2.00 - 4.00[	57405	21.75%	
Variance	3,39	[4.00 - 6.00[	14862	5.63%	
Écart type	1,84	[6.00 - 8.00[	3994	1.51%	
		[8.00 - 10.00[	1599	0.61%	
		[10.00 - 12.00[	1107	0.42%	
		[12.00 - 14.00[	762	0.29%	
		[14.00 - 16.00[	0	0.00%	
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%	

(a)

Figure C. 6 Bassin versant de la rivière Chibouet : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

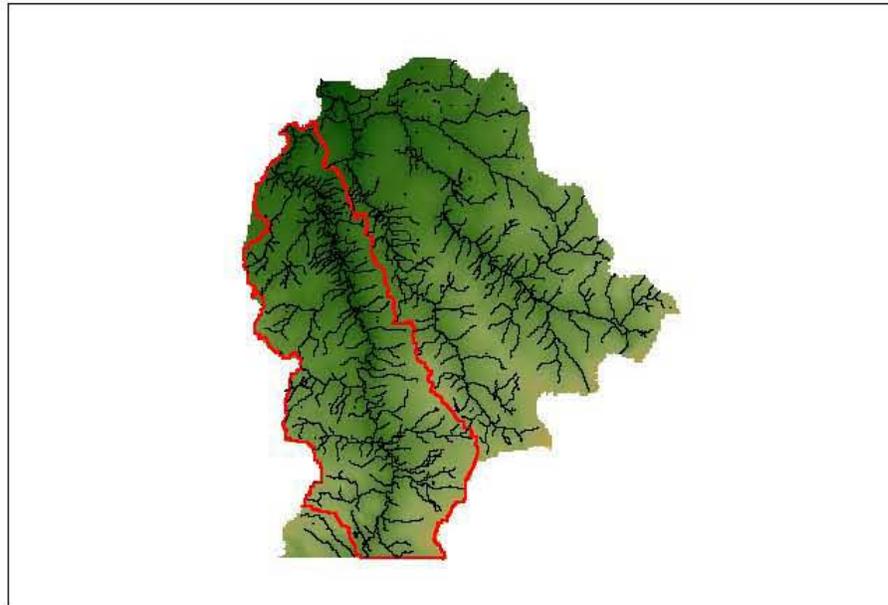


(b)

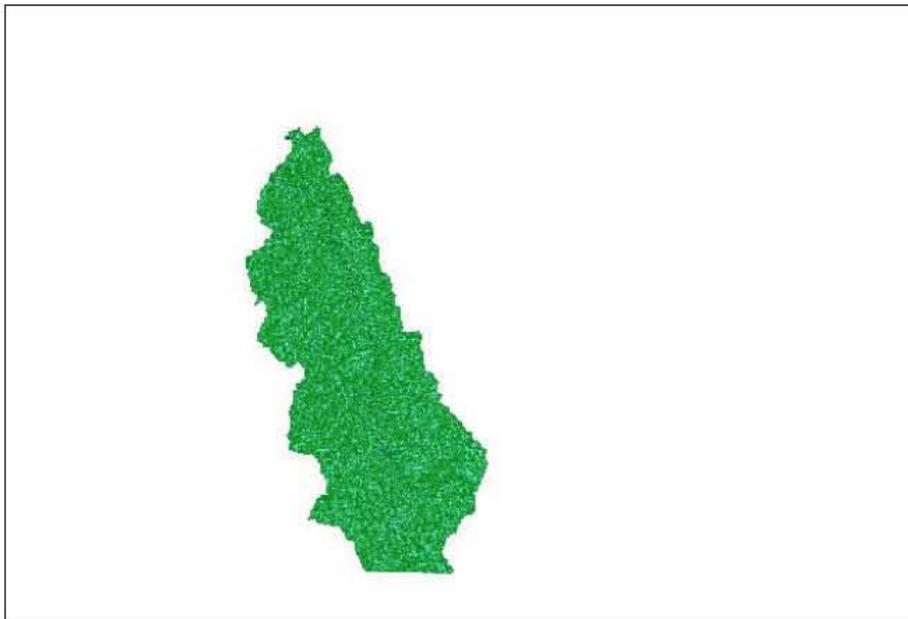
Nombre total de valeurs; 1286454		Distribution des valeurs	
Maximum;	14,06	Nombre de classes;	10
Minimum;	-0,46	Longueur des classes;	2,00
Somme;	2256753,20		
Moyenne;	1,75	[-2.00 - 0.00[;	298593; 23.21%
Médiane;	1,36	[0.00 - 2.00[;	528481; 41.08%
Variance;	3,30	[2.00 - 4.00[;	332544; 25.85%
Écart type;	1,82	[4.00 - 6.00[;	87409; 6.79%
		[6.00 - 8.00[;	25571; 1.99%
		[8.00 - 10.00[;	8125; 0.63%
		[10.00 - 12.00[;	2735; 0.21%
		[12.00 - 14.00[;	2767; 0.22%
		[14.00 - 16.00[;	229; 0.02%
		[16.00 - 18.00];	0; 0.00%

(a)

Figure C. 7 Bassin versant de la rivière Coaticook1 : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

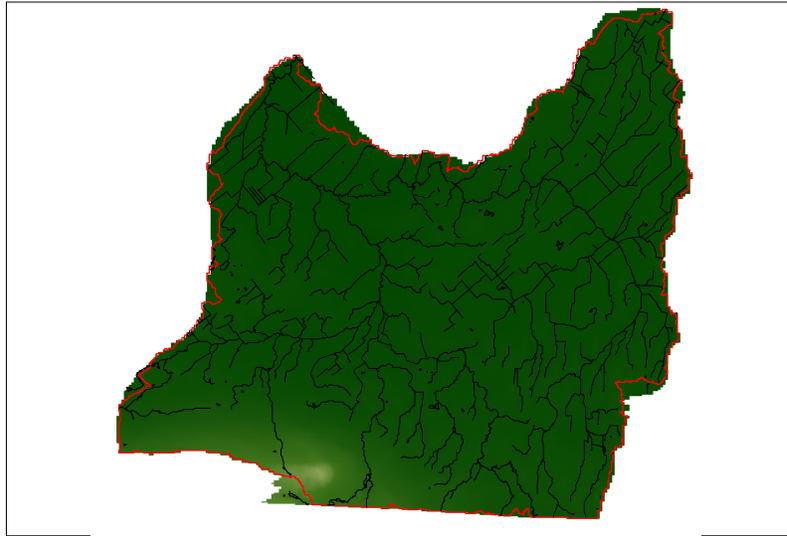


(b)

Nombre total de valeurs; 907981		Distribution des valeurs			
Maximum;	13,71	Nombre de classes; 10			
Minimum;	-0,37	Longueur des classes; 2,00			
Somme;	1553105,70				
Moyenne;	1,71	[-2.00 - 0.00[;	224849;	24.76%	
Médiane;	1,35	[0.00 - 2.00[;	369528;	40.70%	
Variance;	3,27	[2.00 - 4.00[;	231512;	25.50%	
Écart type;	1,81	[4.00 - 6.00[;	54372;	5.99%	
		[6.00 - 8.00[;	16892;	1.86%	
		[8.00 - 10.00[;	6634;	0.73%	
		[10.00 - 12.00[;	1936;	0.21%	
		[12.00 - 14.00[;	2258;	0.25%	
		[14.00 - 16.00[;	0;	0.00%	
		[16.00 - 18.00];	0;	0.00%	

(a)

Figure C. 8 Bassin versant de la rivière Coaticook2 : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

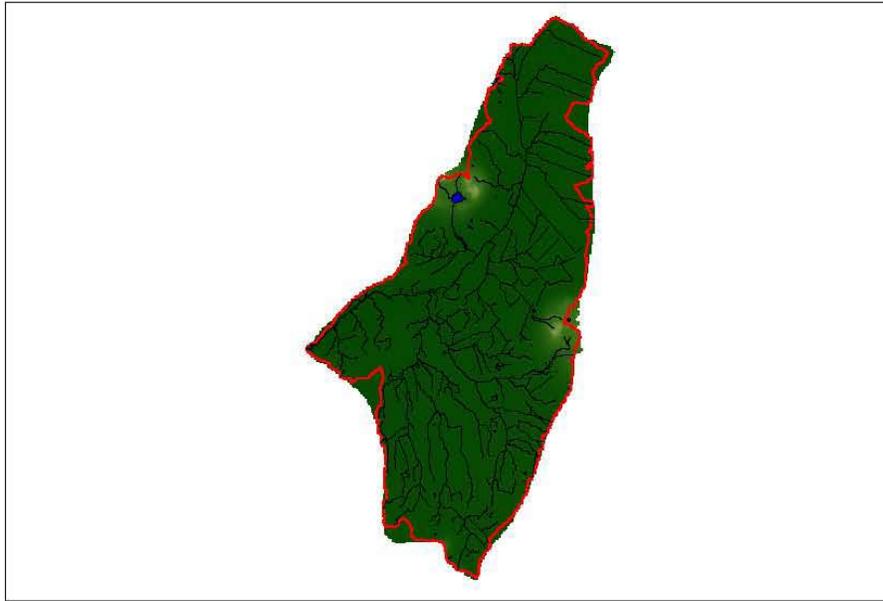


(b)

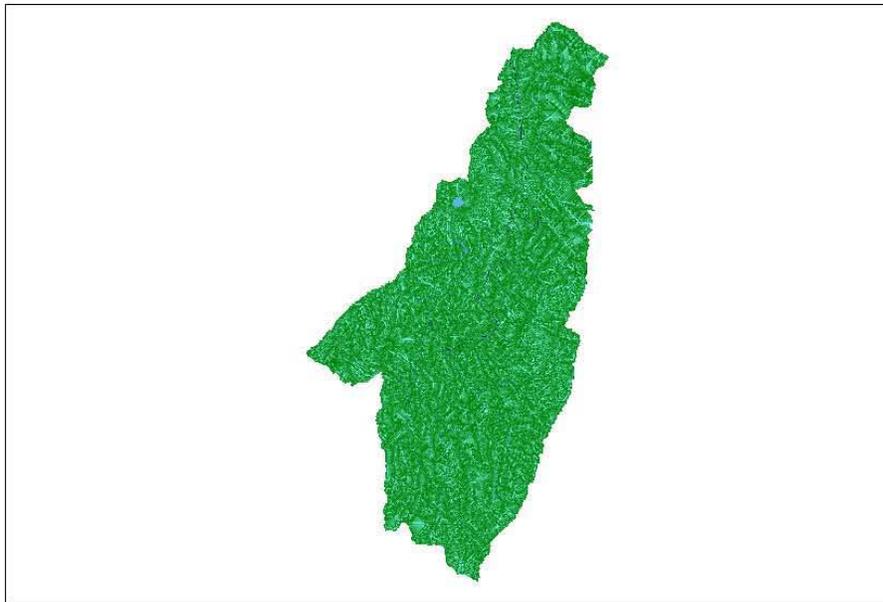
Nombre total de valeurs	1269204	Distribution des valeurs			
Maximum	14,05	Nombre de classes 10			
Minimum	-0,27	Longueur des classes 2,00			
Somme	2063175,58				
Moyenne	1,63	[-2.00 - 0.00[	386796	30.48%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	470370	37.06%
Variance	3,44	[2.00 - 4.00[	293622	23.13%
Écart type	1,85	[4.00 - 6.00[	79446	6.26%
		[6.00 - 8.00[	22285	1.76%
		[8.00 - 10.00[	10344	0.81%
		[10.00 - 12.00[	4091	0.32%
		[12.00 - 14.00[	1942	0.15%
		[14.00 - 16.00[	308	0.02%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%	

(a)

Figure C. 9 Bassin versant de la rivière Des Anglais : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

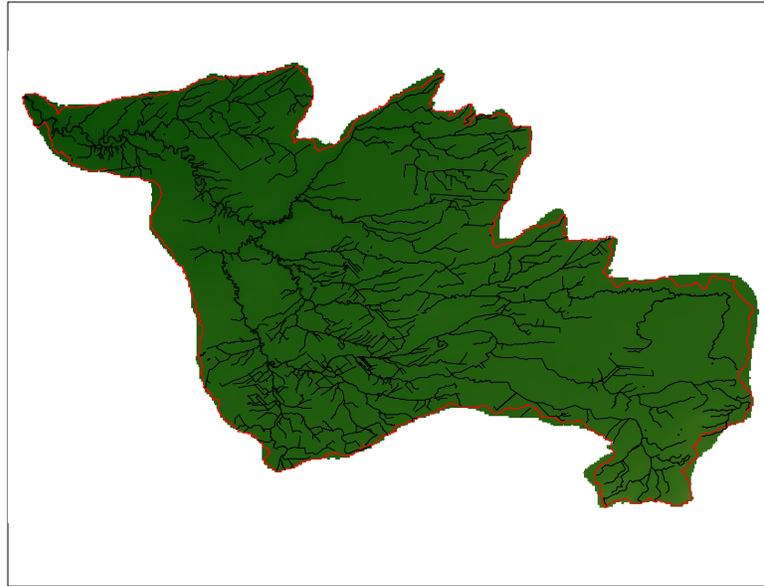


(b)

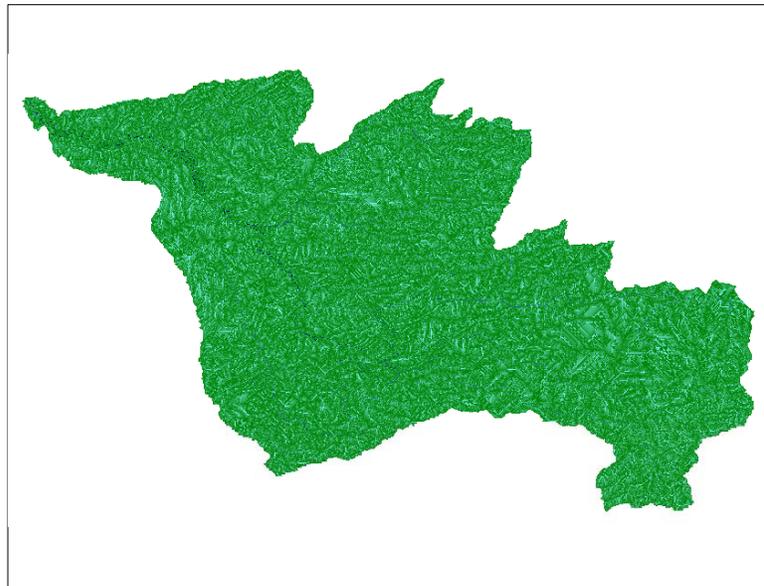
Nombre total de valeurs	791222	Distribution des valeurs		
Maximum	13,58	Nombre de classes	10	
Minimum	-0,37	Longueur des classes	2,00	
Somme	1281030,59			
Moyenne	1,62	[-2.00 - 0.00[	246488	31.15%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	286123	36.16%
Variance	3,43	[2.00 - 4.00[	185661	23.47%
Écart type	1,85	[4.00 - 6.00[	50355	6.36%
		[6.00 - 8.00[	11294	1.43%
		[8.00 - 10.00[	7621	0.96%
		[10.00 - 12.00[	2242	0.28%
		[12.00 - 14.00[	1438	0.18%
		[14.00 - 16.00[	0	0.00%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 10 Bassin versant de la rivière Des Hurons : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

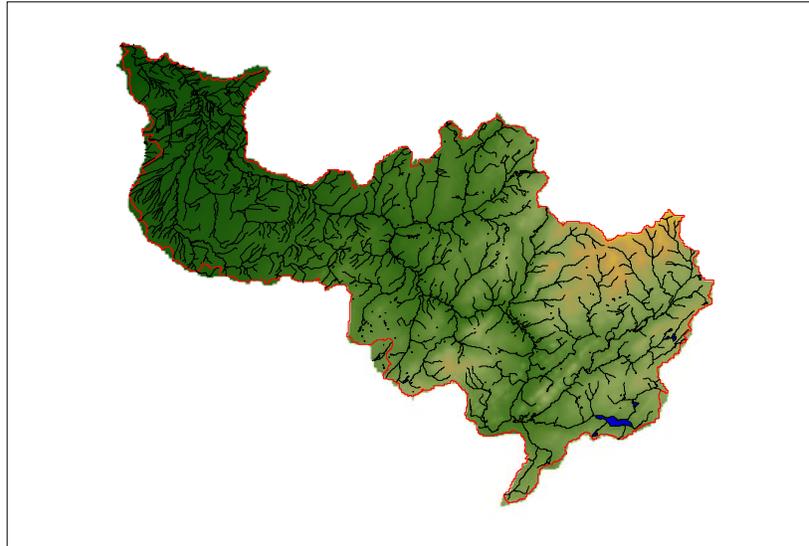


(b)

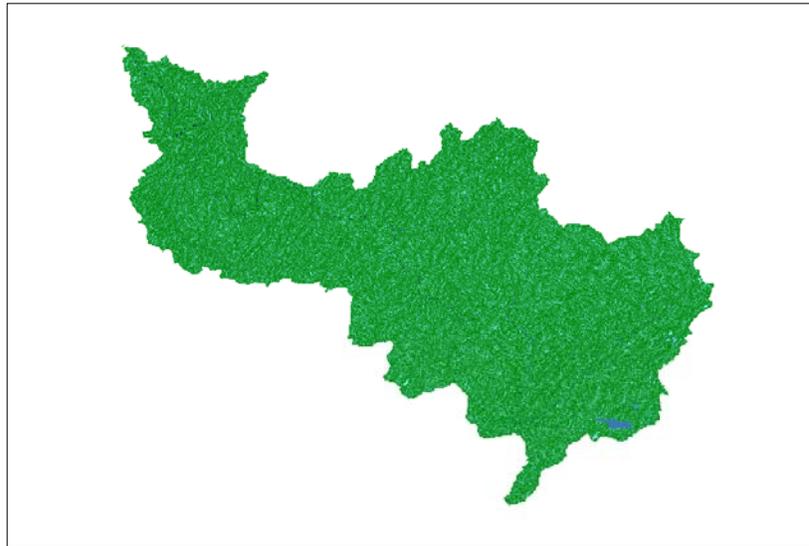
Nombre total de valeurs	2080617	Distribution des valeurs		
Maximum	14,55	Nombre de classes 10		
Minimum	-0,30	Longueur des classes 2,00		
Somme	3365963,78			
Moyenne	1,62	[-2.00 - 0.00[	303013	14.56%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	1121646	53.91%
Variance	3,53	[2.00 - 4.00[	465166	22.36%
Écart type	1,88	[4.00 - 6.00[	129204	6.21%
		[6.00 - 8.00[	33287	1.60%
		[8.00 - 10.00[	13770	0.66%
		[10.00 - 12.00[	8339	0.40%
		[12.00 - 14.00[	3630	0.17%
		[14.00 - 16.00[	2562	0.12%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 11 Bassin versant de la rivière Du Chêne : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

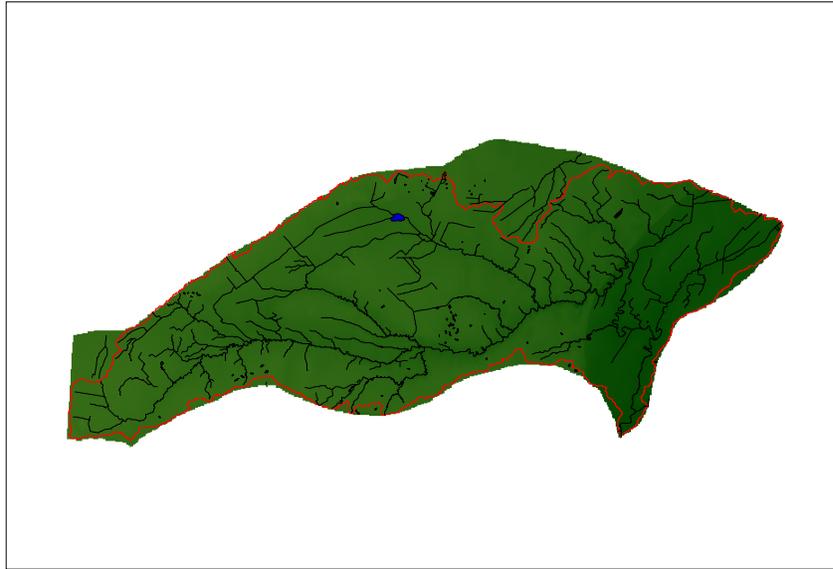


(b)

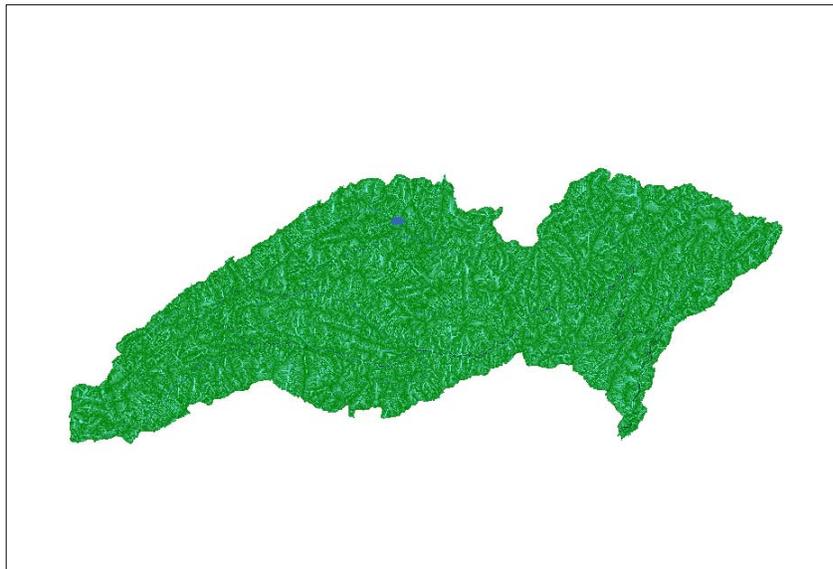
Nombre total de valeurs	3821500	Distribution des valeurs		
Maximum	15,16	Nombre de classes	10	
Minimum	-0,32	Longueur des classes	2,00	
Somme	6452075,42			
Moyenne	1,69	[-2.00 - 0.00[	922326	24.14%
Médiane	1,28	[0.00 - 2.00[	1624452	42.51%
Variance	3,64	[2.00 - 4.00[	889914	23.29%
Écart type	1,91	[4.00 - 6.00[	267372	7.00%
		[6.00 - 8.00[	65178	1.71%
		[8.00 - 10.00[	24681	0.65%
		[10.00 - 12.00[	19264	0.50%
		[12.00 - 14.00[	4342	0.11%
		[14.00 - 16.00[	3971	0.10%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 12 Bassin versant de la rivière Etchemin : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)



(b)

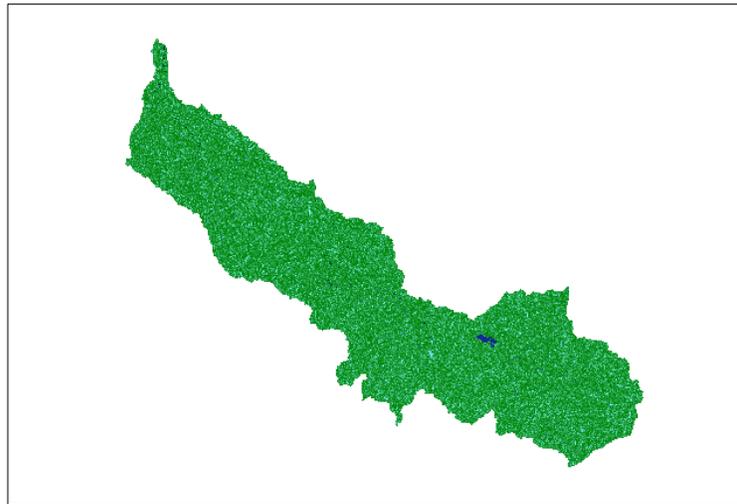
Nombre total de valeurs	973250	Distribution des valeurs		
Maximum	13,78	Nombre de classes	10	
Minimum	-0,22	Longueur des classes	2,00	
Somme	1581893,00			
Moyenne	1,63	[-2.00 - 0.00[	295877	30.40%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	365849	37.59%
Variance	3,50	[2.00 - 4.00[	221411	22.75%
Écart type	1,87	[4.00 - 6.00[	62338	6.41%
		[6.00 - 8.00[	14762	1.52%
		[8.00 - 10.00[	6530	0.67%
		[10.00 - 12.00[	3403	0.35%
		[12.00 - 14.00[	3080	0.32%
		[14.00 - 16.00[	0	0.00%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 13 Bassin versant de la rivière Mascouche : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

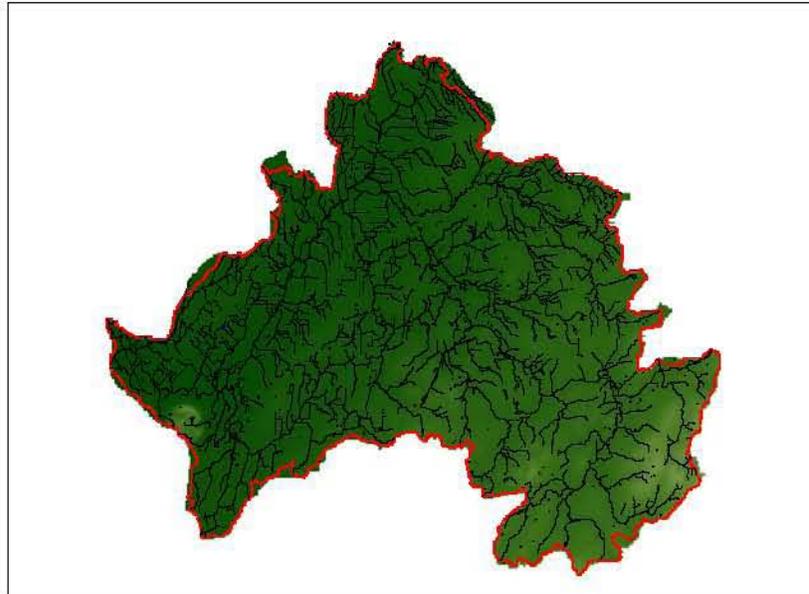


(b)

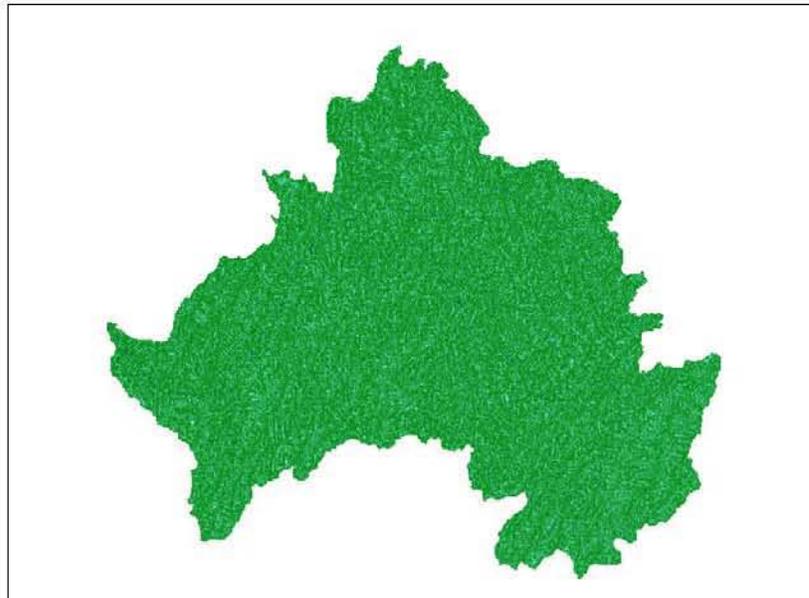
Nombre total de valeurs	4315743	Distribution des valeurs		
Maximum	15,28	Nombre de classes	10	
Minimum	-0,33	Longueur des classes	2,00	
Somme	7222328,11			
Moyenne	1,67	[-2.00 - 0.00[	840402	19.47%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	2046721	47.42%
Variance	3,69	[2.00 - 4.00[	1012746	23.47%
Écart type	1,92	[4.00 - 6.00[	285117	6.61%
		[6.00 - 8.00[	71417	1.65%
		[8.00 - 10.00[	28713	0.67%
		[10.00 - 12.00[	13256	0.31%
		[12.00 - 14.00[	4761	0.11%
		[14.00 - 16.00[	12610	0.29%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 14 Bassin versant de la rivière Nicolet : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

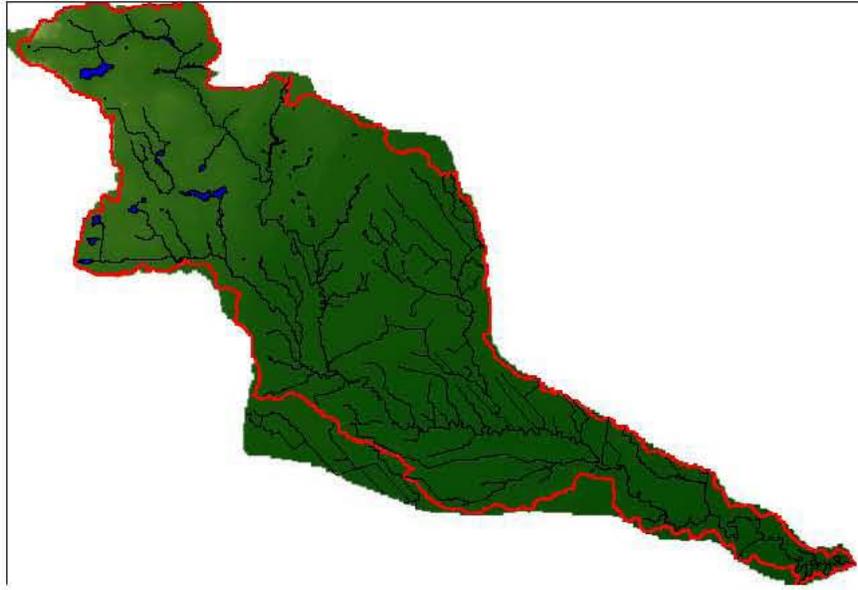


(b)

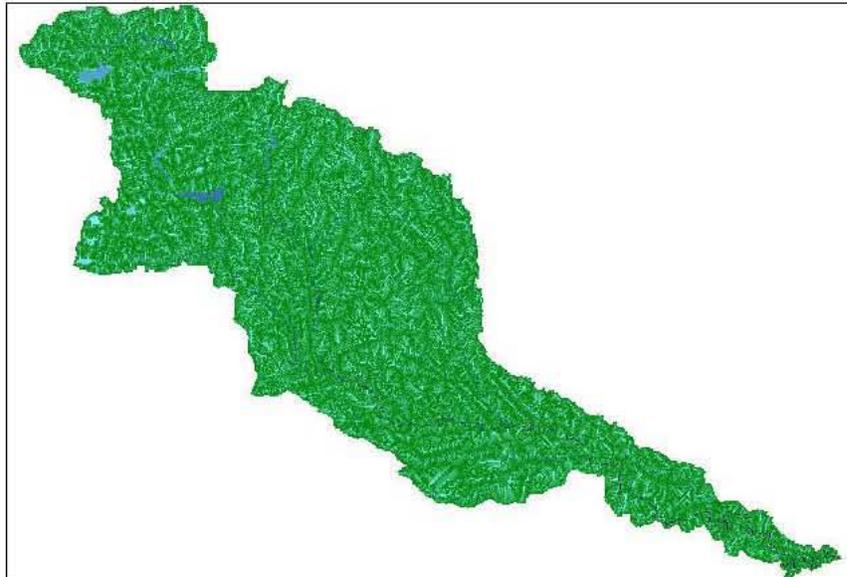
Nombre total de valeurs	4112112	Distribution des valeurs			
Maximum	15,23	Nombre de classes 10			
Minimum	-0,36	Longueur des classes 2,00			
Somme	6943580,94				
Moyenne	1,69	[-2.00 - 0.00[	1090477	26.52%
Médiane	1,35	[0.00 - 2.00[	1638763	39.85%
Variance	3,34	[2.00 - 4.00[	1000585	24.33%
Écart type	1,83	[4.00 - 6.00[	263956	6.42%
		[6.00 - 8.00[	66093	1.61%
		[8.00 - 10.00[	30337	0.74%
		[10.00 - 12.00[	12878	0.31%
		[12.00 - 14.00[	6130	0.15%
		[14.00 - 16.00[	2893	0.07%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%	

(a)

Figure C. 15 Bassin versant de la rivière Noire : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)

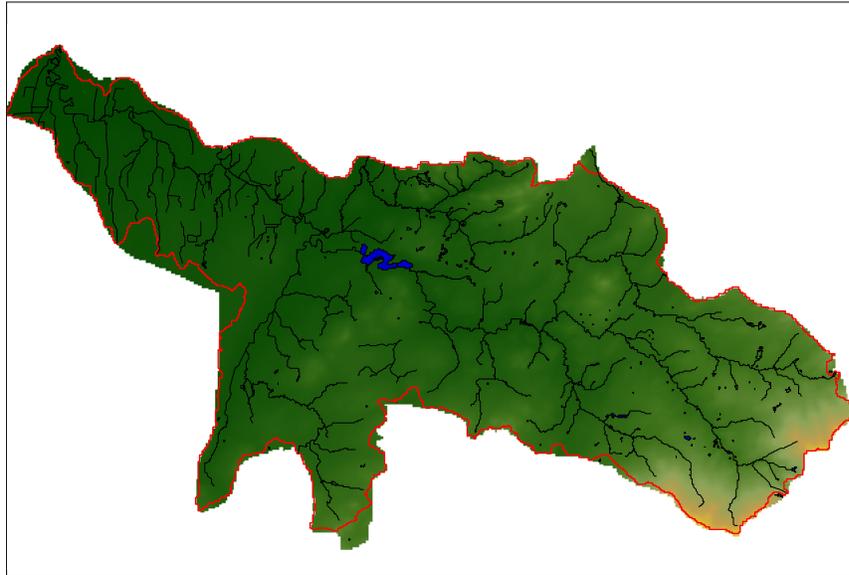


(b)

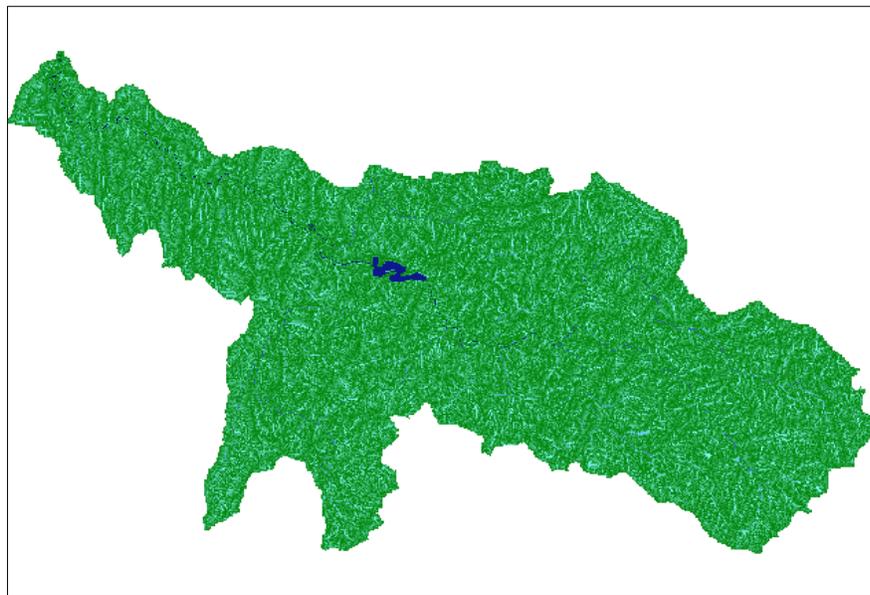
Nombre total de valeurs	526125	Distribution des valeurs			
Maximum	13,17	Nombre de classes 10			
Minimum	-0,31	Longueur des classes 2,00			
Somme	857275,01				
Moyenne	1,63	[-2.00 - 0.00[	155285	29.51%
Médiane	1,09	[0.00 - 2.00[	208062	39.55%
Variance	3,85	[2.00 - 4.00[	117286	22.29%
Écart type	1,96	[4.00 - 6.00[	25834	4.91%
		[6.00 - 8.00[	8384	1.59%
		[8.00 - 10.00[	6222	1.18%
		[10.00 - 12.00[	3364	0.64%
		[12.00 - 14.00[	1688	0.32%
		[14.00 - 16.00[	0	0.00%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%	

(a)

Figure C. 16 Bassin versant de la rivière Saint-Esprit : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.



(c)



(b)

Nombre total de valeurs	1070094	Distribution des valeurs		
Maximum	13,88	Nombre de classes	10	
Minimum	-0,39	Longueur des classes	2,00	
Somme	1787649,01			
Moyenne	1,67	[-2.00 - 0.00[	266164	24.87%
Médiane	1,10	[0.00 - 2.00[	454757	42.50%
Variance	3,74	[2.00 - 4.00[	248348	23.21%
Écart type	1,93	[4.00 - 6.00[	66575	6.22%
		[6.00 - 8.00[	18359	1.72%
		[8.00 - 10.00[	7257	0.68%
		[10.00 - 12.00[	3339	0.31%
		[12.00 - 14.00[	5295	0.49%
		[14.00 - 16.00[	0	0.00%
		[16.00 - 18.00]	0	0.00%

(a)

Figure C. 17 Bassin versant de la rivière Yamaska : (a) paramètres statistiques de la distribution des valeurs de l'IT ; (b) représentation cartographique de la distribution des valeurs de l'IT ; et (c) MNA, réseau hydrographique corrigé, et contour du bassin.