Record Number:	25390
Author, Monographic:	Racine, M. J.
Author Role:	
Title, Monographic:	Analyse de l'effet du changement de résolution matricielle d'un modèle numérique d'altitude sur les performances d'un modèle de simulation de la qualité de l'eau en milieu agricole
Translated Title:	
Reprint Status:	
Edition:	
Author, Subsidiary:	
Author Role:	
Place of Publication:	Québec
Publisher Name:	INRS-Eau, Terre & Environnement
Date of Publication:	2002
Original Publication D	ate: Juillet 2002
Volume Identification:	
Extent of Work:	vii, 36
Packaging Method:	pages
Series Editor:	
Series Editor Role:	
Series Title:	INRS-Eau, Terre & Environnement, rapport de recherche
Series Volume ID:	623
Location/URL:	
ISBN:	2-89146-488-5
Notes:	Rapport annuel 2002-2003
Abstract:	Numéro de rapport et ISBN fourni par Jean-Daniel 20020704. Numéro et isbn demandés par DCluis 20020704 5.00\$
Call Number:	R000623
Keywords:	rapport/ ok/ dl

Analyse de l'effet du changement de résolution matricielle d'un modèle numérique d'altitude sur les performances d'un modèle de simulation de la qualité de l'eau en milieu agricole

Rapport de recherche No R-623

Juillet 2002

Analyse de l'effet du changement de résolution matricielle d'un modèle numérique d'altitude sur les performances d'un modèle de simulation de la qualité de l'eau en milieu agricole

Application du nouveau modèle AGNPS au bassin versant de la Boyer-Nord et analyse critique de ses simulations

(projet concerté FCAR-IRDA)

Par

Marie-Josée Racine

Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE

2800, rue Einstein, Case postale 7500, Sainte-Foy (Québec), G1V 4C7

Rapport de recherche No R-623

Juillet 2002

© INRS-ETE 2002 ISBN: 2-89146-488-5

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	V
1. INTRODUCTION	1
2. LE MODÈLE ANNAGNPS	3
3. MÉTHODOLOGIE	5
4. CARACTÉRISTIQUES DE LA BN AU 20 M AU 125 M	9
5. SIMULATIONS	11
 5.1 SIMULATIONS SPATIALES	
6. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION	23
 6.1 LES PENTES 6.2 L'OCCUPATION DU SOL 6.3 LES SÉRIES DE SOL 	23 28 29
7. CONCLUSION	
8. RÉFÉRENCES	

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 :	CARACTÉRISTIQUES DES DEUX SOUS-BASSINS
TABLEAU 2 :	SUPERFICIES COUVERTES PAR LES OCCUPATIONS DU SOL SUR LES DEUX SOUS-BASSINS 10
TABLEAU 3 :	CUMULATIF DES SIMULATIONS POUR LES DEUX SOUS-BASSINS
TABLEAU 4 :	CLASSIFICATION DES SÉRIES DE SOL EN TEXTURES 13
TABLEAU 5 :	CARACTÉRISTIQUES DES CELLULES LES PLUS À RISQUE SUR LA BN AU 20 M 14
TABLEAU 6 :	CARACTÉRISTIQUES DES CELLULES LES PLUS À RISQUE SUR LA BN AU 125 M 15
TABLEAU 7 :	Cellules de la BN au 125 m vs les sous-cellules de la BN au 20 m 19
TABLEAU 8 :	CUMULATIF DES SIMULATIONS POUR 1998 ET 1999 21
TABLEAU 9 :	PENTES DES CELLULES ET DE LEUR ÉROSION SUR LA BN AU 20 M ET AU 125 M 26
TABLEAU 10 :	FACTEUR C MOYEN DES CULTURES POUR LES DEUX ANNÉES DE SIMULATION

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 :	OCCUPATIONS DU SOL SELON L'IMAGE SATELLITE RECLASSIFIÉE DE 1996	7
FIGURE 2 :	ATTRIBUTION DE L'OCCUPATION DU SOL AUX CELLULES HYDROLOGIQUES	8
FIGURE 3 :	CELLULES ET TRONÇONS DE LA BOYER-NORD AU 20 M ET AU 125 M	9
FIGURE 4:	REQUÊTE DANS ARCVIEW	14
FIGURE 5 :	Sous-cellules de la BN au 20 m avec leur cellule de la BN au 125 m	16
FIGURE 6 :	SIMULATIONS MENSUELLES À L'EXUTOIRE DE LA BN AU 20 M ET AU 125M	22
FIGURE 7 :	PENTE DES PIXELS AVEC 20 M ET 125 M DE RÉSOLUTION	24
FIGURE 8 :	Pentes des cellules de la BN au 20 m et au 125 m	25
FIGURE 9 :	COURS D'EAU PRINCIPAUX UTILISÉS SUR LES DEUX SOUS-BASSINS POUR TRACER LEUR PROFIL	27
FIGURE 10:	PROFIL DU COURS D'EAU PRINCIPAL SUR LA BN AU 20 M ET AU 125 M	27

1. Introduction

L'application d'un modèle à un grand territoire, tel celui du bassin versant de la rivière Boyer, ne peut pas se réaliser avec un même niveau d'information que celui d'un territoire plus petit, comme un de ses sous-bassins, faute de temps et d'argent. En effet, le modèle *AnnAGNPS* a été appliqué au sous-bassin bien documenté de la Boyer-Nord afin de prédire la pollution diffuse d'origine agricole. Les données recueillies pour le sous-bassin versant ont ensuite été transposées au bassin versant complet de la Boyer. Nous espérions ainsi obtenir des résultats simulés qui resteraient valables avec le changement d'échelle.

Le but de cette étude est donc de comparer les résultats simulés par le modèle pour le sous-bassin pour lequel nous avions des données d'entrée détaillées avec ceux du même sous-bassin moins documenté et de moins grande résolution afin de vérifier si le changement d'échelle est valable.

Le présent rapport portera sur les différences entre les prédictions spatiales et temporelles obtenues avant et après le changement d'échelle. Les résultats seront présentés et discutés.

Le modèle AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source pollution) est la version continue de son prédécesseur AGNPS, un modèle de simulation épisodique basé sur l'équation universelle de perte de sol (USLE) et sur la méthode du «SCS Curve Number» et créé par Young et al. (1989) du Service de la recherche agricole (ARS) du département de l'agriculture des États-Unis (USDA). AnnAGNPS, qui a été développé au laboratoire national de sédimentation (National Sedimantation Laboratory) d'Oxford au Mississippi, permet la simulation continue des sédiments et nutriments transportés par ruissellement jusqu'au système hydrographique et exportés du bassin versant suite à des événements météorologiques, à des opérations agricoles ou au développement des cultures.

Le modèle compte trois parties distinctes: la préparation des données d'entrée, le processus de simulation et l'organisation des sorties. Les données climatiques, les paramètres physiques du bassin versant et les informations concernant la gestion du territoire sont nécessaires pour effectuer la simulation.

Le programme *Flownet*, qui est constitué des programmes *TopAGNPS* et *AGFlow*, génère les paramètres physiques du bassin synthétique, comme les limites du sous-bassin versant et de ses cellules hydrologiques, la pente des cellules et les tronçons, utilisant l'algorithme de drainage D8. Cet algorithme nommé *TOPAZ* (Topographic ParameteriZation), a été développé par Garbrecht et Martz [1]. Il considère une fenêtre d'altitude de 3x 3 où le pixel central est traité relativement à ses huit voisins. Le plus fort gradient indique le sens unique d'écoulement de l'eau dans la cellule hydrologique, qui elle s'inscrit dans la génération du réseau hydrographique et des subdivisions du bassin versant.

Le processus de simulation même est basé sur le «*SCS Curve Number*» pour le ruissellement, sur l'équation universelle de perte de sol révisée (RUSLE) pour la mise en transport des sédiments, sur l'équation de Bagnold pour le cheminement des sédiments et sur la procédure «*SCS TR-55*» pour le calcul du temps de concentration pour une cellule. Ensuite, des ajustements quotidiens

sont effectués sur plusieurs paramètres afin de tenir compte de l'évolution des cultures, des opération au champ, des conditions climatiques, etc. *AnnAGNPS* a la capacité de répertorier les sources et les contributions relatives des contaminants.

En dernier lieu, le programme O*utput Processor* permet de réorganiser les sorties du modèle. En effet, il est possible de sélectionner les sorties que nous voulons conserver et de les obtenir en format facilement importable dans un SIG, tel *ArcView*.

3. Méthodologie

Des méthodes et des sources différentes ont été utilisées pour la création du bassin synthétique ainsi que pour l'attribution d'une occupation et d'une série de sol aux cellules hydrologiques. Un modèle numérique d'altitude de 20 m de résolution a été utilisé pour la simulation de cellules et tronçons du sous-bassin de la Boyer-Nord. Ce MNA avait été créé par Quentin [2] à partir de l'interpolation de courbes de niveau d'une carte topographique numérisée du Ministère des Ressources Naturelles du Québec (1994) ayant une échelle de 1:20 000. Plusieurs aires critiques de drainage (*Critical Source Area*) ont été établies pour la Boyer-Nord afin de représenter le plus fidèlement possible le réseau hydrographique: 1, 5, 15 ou 50 ha.

Quentin, de part ses recherches, mentionnait avoir observé qu'un réseau hydrologique optimum était obtenu pour le bassin versant de la Boyer par la combinaison d'un MNA de 125 m de résolution et d'un aire critique de drainage de 100 ha. En se basant sur cette affirmation, il a été décidé de générer le bassin synthétique de la Boyer en suivant ces indications. Les détails des démarches suivies pour l'obtention du bassin synthétique de la Boyer se trouve dans le rapport de stage de Racine [3].

Dans l'éditeur d'entrée, il était important d'attribuer une valeur de type de sol et d'occupation de sol pour chaque cellule hydrologique du bassin versant. Rappelons-nous qu'il a été choisi de prendre la valeur qui couvrait la plus grande superficie sur chaque cellule puisqu'elle était plus représentative que celle définie par occurrence. Afin d'obtenir la valeur de sol ou d'occupation du sol qui couvraient la plus grande superficie sur chaque cellule, les extensions *CRWR-Raster* et *CRWR-Vector* ont été utilisées dans ArcView. *CRWR-Raster* s'appliquait aux thèmes en *Grid* (matriciel), telle l'image satellite reclassifiée de 1996. L'extension *CRWR-Vector* a plutôt été utilisée afin de caractériser chaque cellule par une série de sol dominante en superficie puisqu'elle s'emploie sur les thèmes en format *shape* (vectoriel), telle la carte des sols numérisée. Plusieurs fonctions étaient disponibles à l'intérieur de ces deux extensions. Pour ce qui est de *CRWR-Raster*, il fallait utiliser "*average grid value on polygon*" et puis "*Most likely value*". Pour

ce qui est de l'extension *CRWR-vector*, c'est la fonction "*poly to poly property transfert*" et puis "*Most frequent value*" qu'il a fallu choisir. Contrairement à ce que le nom de cette dernière fonction nous laisse croire, elle attribuait bien la valeur du sol qui couvrait la plus grande superficie sur la cellule et non pas la valeur définie par occurrence.

L'image satellite reclassifiée de 1996 contient des catégories générales d'occupation du sol pour les cultures (figure 1). De ce fait, il était impossible d'identifier les types de céréales ou de maïs, qui se différencient de part leur opérations agricoles et caractéristiques physiques. Chardonneau [4] a tout d'abord trouvé l'occupation du sol qui couvrait la plus grande superficie sur les parcelles de la Boyer-Nord à partir de l'image satellite et a par la suite précisé ces données de part l'entretien avec les agriculteurs. Il a ensuite défini l'occupation du sol qui couvrait la plus grande superficie sur chaque cellule hydrologique de la Boyer-Nord à partir de l'information attribuée aux parcelles (figure 2).

Lorsque que nous voulions identifier l'occupation du sol pour les cellules de la Boyer, la seule source d'information disponible était l'image satellite de 1996. Puisqu'il était nécessaire de définir les sous-catégories de céréales sur la Boyer, il fallait connaître tout d'abord leur proportion respective sur le sous-bassin de la Boyer-Nord. Étant donné que l'attribution de ses souscatégories aux cellules en céréales sur la Boyer s'est réalisée de manière aléatoire, leur localisation devenait fictive.



Figure 1 : Occupations du sol selon l'image satellite reclassifiée de 1996



Figure 2 : Attribution de l'occupation du sol aux cellules hydrologiques

Nous avons fait tourner le modèle avec les paramètres d'entrée qui ont été améliorés par Proulx [5] et avec les nouvelles données climatiques (depuis 1976) et deux années d'initialisation (1996-1997).

4. Caractéristiques de la BN au 20 m au 125 m

Une comparaison des données précises du sous-bassin versant de la Boyer-Nord avec 20 mètres de résolution sera faite avec les données résultant du changement d'échelle sur le sous-bassin de la Boyer-Nord inclus dans la Boyer généralisée. Nous ferons donc référence à la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m (figure 3).



Figure 3 : Cellules et tronçons de la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m

Tout d'abord, la superficie de la Boyer-Nord au 125 m est un peu plus élevée que celle de la Boyer-Nord au 20 m (tableau 1). Le nombre de cellules et de tronçons diminue avec le changement d'échelle en passant respectivement de 464 à 38 et de 190 à 16. La longueur et la superficie totale du réseau hydrographique va diminuer du même coup.

Caractéristiques	BN 20 m	BN 125 m
Superficie du bassin versant (ha)	2656	2800
Nombre de cellules	464	37
Nombre de pixels	66379	1792
Superficie moyenne des cellules (ha)	6	76
Pente moyenne des cellules (%)	.4.9	2
Nombre de tronçons	190	16
Longeur moyenne de tronçon (m)	453	1227
Longueur du réseau hydrographique (Km)	87	20
Superficie couverte par les tronçons (ha)	138	162

Tableau 1 : caractéristiques des deux sous-bassins

Pour comparer la pente moyenne des deux sous-bassins versants, elle a été pondérée par la surface. Nous constatons qu'elle diminue de 2.9% avec le changement d'échelle. Pour ce qui est des occupations du sol suite au changement d'échelle, nous remarquons que la proportion de céréales passe de 4% à 18%, le maïs disparaît, la superficie en foin double et la forêt diminue de 13% (tableau 2). Il est aussi à noter que la Boyer Nord au 125 m a cinq séries de sol en moins.

Tableau 2 : Superficies couvertes par les occupations du sol sur les deux sous-bassins

	Boyer Nord	Boyer Nord 125 m				
Occupsol	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%		
Céréales	96	4	500	18		
Maïs	644	24	x	х		
Foin	806	30	1655	59		
Forêt	960	36	645	23		
Pâturage	15	1	x	х		
Zones urbaines	59	2	x	х		
Zones inconnues	74	3	х	х		
Total (AnnAGNPS)	2656	100	2800	100		

5.1 Simulations spatiales

Tout d'abord, il est important de spécifier au modèle l'exutoire de la Boyer-Nord au 125 m puisque nous voulons obtenir les résultats pour le même exutoire défini pour la Boyer-Nord au 20 m. Dans l'éditeur d'entrée, il faut indiquer le tronçon qui sera considéré comme l'exutoire dans la première case du formulaire "*Reach Output Specifications*". Dans notre cas, c'est le tronçon 82 qui a été choisi à l'intérieur de la Boyer comme exutoire. Les résultats simulés seront donc pris en amont de ce tronçon (*upstream*).

Il serait pertinent d'expliquer les résultats simulés par *AnnAGNPS* pour l'azote, le ruissellement et l'érosion des cellules. La contribution des cellules en azote est donnée à l'exutoire (*nutrient loading*) et même chose pour la contribution des cellules en ruissellement (*water loading*). La contribution des cellules en érosion est calculée de trois manières par le modèle : l'érosion sur les cellules (*landscape and watershed erosion*), la contribution des cellules en sédiments au réseau hydrographique (*landscape and watershed sediment yield to the stream system*) et à l'exutoire du sous-bassin (*sediment loading*). Seule l'érosion sur la cellule sera considérée pour la comparaison des résultats. Il est à noter que les simulations en phosphore étant erronées, elles ne seront pas considérées dans le présent rapport.

Étant donné que les deux sous-bassins n'ont pas la même superficie, nous avons dû comparer les résultats une fois divisés par l'aire drainée de la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m. Le modèle donnait déjà le ruissellement du bassin versant reporté sur une surface en mm/an (1 mm = 10 m^3 d'eau par hectare). Pour l'azote et l'érosion, il a fallu diviser nous-mêmes la production totale des cellules par la superficie des sous-bassins versants. Nous observons qu'en comparaison avec les simulation de la Boyer-Nord au 20 m, la contribution des cellules en ruissellement et l'azote augmentent respectivement de 8.1% et 7.3 % et l'érosion sur les cellules diminue d'un facteur de 20 sur la Boyer-Nord au 125 m (tableau 3).

Prédictions	BN 20 m	BN 125 m
Superficie (ha)	2 656	2 800
Ruissellement (m ³ /an)	2 950 187	3 411 253
Ruissellement (mm/an)	111	120
Azote (tonnes/an)	103	119
Azote (tonnes/ha/an)	0.038	0.041
Érosion sur la cellule (tonnes/an)	3 061	153
Érosion sur la cellule (tonnes/ha/an)	1	0.05

Tableau 3 : Cumulatif des simulations pour les deux sous-bassins

5.1.1 Caractéristiques des cellules les plus contributives

Nous avons défini les caractéristiques des cellules (texture de sol, pente et occupation du sol) qui contribuent le plus au ruissellement, à l'érosion et aux pertes en azote sur la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m. Ainsi, il sera peut-être possible de voir si les caractéristiques des cellules les plus productives sont les mêmes avant et après le changement d'échelle des données d'entrée. Pour obtenir l'érosion et les pertes en azote d'un groupe de cellules (ex. cellules en céréales), nous prenons les valeurs en tonnes/an, nous les additionnons et nous divisons le total par la superficie couverte par l'ensemble des cellules. Cela permet de comparer la contribution des groupes de cellules en tonnes/ha/an. Étant donné que nous cherchons à reporter le ruissellement sur une surface pour comparer les groupes de cellules entre eux, nous avons décidé de présenter les résultats en mm/an. Il est à noter que pour l'étude des séries de sol les plus productives, elles ont été regroupées en différentes textures (tableau 4). Pour la présentation et l'interprétation des résultats, nous avons englobé les sous-catégories de céréales (avoine, blé et orge) en une seule catégorie, soit celle des céréales. La même situation se présentait pour les cellules en foin qui comportaient des sous-catégories d'épandage (bovin, porcin ou sans épandage).

Textures de sol	Séries de sol
Loam	Loam Kamouraska
	Tourbe
Loam limoneux	Alluvions non-différenciés
	Loam La Pocatière
Loam sableux	Loam sablo-graveleux Saint-André
	Loam sablo-pierreux de Mawcook
	Loam pierreux Dessaint
	Loam sablo-schisteux St-Nicolas
	Loam sablo-graveleux Rivière-du-loup
	Terre noire et marécage
	Loam sablo-graveleux Fourchette
	Loam sableux Neubois
	Loam Saint-Aimé
Argile limoneuse	Argile sableuse Sainte-Rosalie
Sable limoneux	Loam sablo-graveleux Beaurivage

Tableau 4 : Classification des se	séries de sol en textures
-----------------------------------	---------------------------

Nous croyons qu'il serait aussi pertinent d'expliquer les requêtes effectuées avec *ArcView* pour l'obtention des résultats présentés plus bas. Une fois dans la table d'un thème, nous allons dans "*Query Builder*". Le but de la requête sera de trouver l'érosion, les pertes en azote ou le ruissellement total des cellules faisant partie d'une catégorie de classement selon la texture du sol, la pente ou l'occupation du sol. Une fois les éléments d'une catégorie sélectionnés, il est possible d'obtenir la somme de la production du groupe de cellules en cliquant sur le champs désiré et en utilisant la fonction "*statistics*" dans le menu "*field*". Voici un exemple d'une requête réalisée pour la sélection des cellules en céréales sur la Boyer-Nord au 20 m (figure 4).

2Diş					Values	
Shape}	<u>+</u>	=	<>	and	"Maïs ensilage"	
Gridcode]					"Orge"	
Sol]					''Pâturage''	
.egende]		<	<=	not	"Zones inconnues"	
Coupsol96]				ليسب	"Zones urbaines"	
.égende]					1	
^p ente]	<u>.</u>				Update Values	
.égende] = "Avoine") (or ([Légende] = ''	Blé'') or ([L	_égende] :	= ''Orge'')	-	New Set
						Add To Set

Figure 4: Requête dans ArcView

Sur la Boyer-Nord au 20 m, nous remarquons que la texture du sol qui entraîne le plus de ruissellement est l'argile limoneuse (268 mm/an). Les pentes les plus élevées (9% à 18%) et les cellules en céréales et en maïs produisent aussi le plus de ruissellement (160 et 140 mm/an). Ensuite, nous observons que l'argile limoneuse (4.7 tonnes/ha/an), les plus fortes pentes (9% à 18%) et les cellules en maïs (2.5 tonnes/ha/an) contribuent aux plus grandes pertes en sédiments. Finalement, les cellules en céréales et en maïs produisent le plus d'azote (0.07 t/ha/an et 0.05 t/ha/an) (tableau 5).

	Boyer Nord au 20 m				
Caracteristiques	Ruissellement	Érosion	Ν		
Texture de sol	Argile limoneuse	Argile limoneuse	Х		
Pente (%)	9 à 18	9 à 18	х		
Occupations du sol	1) Céréales	Maïe	1) Céréales		
Occupations du soi	2) Maïs	141012	2) Maïs		

Tableau 5 : caractéristiques des cellules les plus à risque sur la BN au 20 m

Sur la Boyer-Nord au 125 m, les cellules qui entraînent le plus de ruissellement sont en loam sableux (187 mm/an), ont les plus faibles pentes (0% à 3%) et sont recouvertes de céréales (260 mm/an). Les cellules qui contribuent le plus aux pertes en sédiments sont en sable limoneux (0.09 tonnes/ha/an), ont de faibles pentes (0% à 3%) et sont recouvertes de céréales (0.21

tonnes/ha/an). Concernant la production en azote, c'est les cellules en céréales (1.6 tonnes/ha/an) qui sont les plus productives (tableau 6).

	Boyer Nord au 125 m					
Caracteristiques	Ruissellement	Érosion	Ν			
Texture de sol	Loam sableux	Sable limoneux	х			
Pente (%)	0 à 3	0 à 3	х			
Occupations du sol	Céréales	Céréales	Céréales			

Tableau 6 : Caractéristiques des cellules les plus à risque sur la BN au 125 m

Nous avons vu qu'il existe des différences dans les résultats de la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m. En effet, c'est sur les cellules en céréales et en maïs sur la Boyer-Nord au 20 m que l'on retrouve le plus de ruissellement, d'érosion et de pertes en azote. La même situation survient sur la Boyer-Nord au 125 m, à l'exception du maïs qui a disparu. Les pentes les plus élevées entraînent le plus d'érosion et de ruissellement sur la Boyer-Nord au 20 m alors que sur la Boyer-Nord au 125 m, il semble que le changement des pentes, qui va de 0 % à 6 %, n'ai pas d'influence sur l'augmentation des pertes en sédiment et sur le ruissellement. Ensuite, les textures du sol n'ont pas les mêmes contributions en ruissellement et en érosion sur les deux sous-bassins versants. En effet, les cellules en argile limoneuse sont les plus productives sur la Boyer-Nord au 20 m alors que c'est plutôt les cellules en loam sableux et en sable limoneux qui sont les plus contributives sur la Boyer-Nord au 125 m. Cela s'explique par le fait que l'argile limoneuse a disparu avec le changement d'échelle.

5.1.2 Comparaison de cellules aux deux échelles

Nous avons choisi dix cellules sur la Boyer-Nord au 125 m afin de les comparer à l'ensemble des sous-cellules de la Boyer-Nord au 20 mètres se trouvant à l'intérieur. Il sera ainsi possible de comparer les changements locaux dans les caractéristiques des cellules avant et après le changement d'échelle. Tout d'abord, les limites des cellules de la Boyer-Nord au 20 m ne correspondent pas avec celles de leur cellule de la Boyer-Nord au 125 m (figure 5). Pour cette raison, les cellules de la Boyer-Nord 20 m se situant partiellement à l'intérieur et à l'extérieur des

dix cellules au 125 m ont été sectionnées. Ainsi, il a été possible de comparer leurs parties contenues à l'intérieur des limites des cellules de la Boyer-Nord au 125 m avec celles-ci.



Figure 5 : Sous-cellules de la BN au 20 m avec leur cellule de la BN au 125 m

La fonction "*intersect two themes*" dans "*GeoProcessing Wizzard*" dans *ArcView* permet d'obtenir les cellules contenues à l'intérieur d'une plus grosse cellule avec les valeurs s'y rattachant. Cette requête combine la cellule de la Boyer-Nord au 125 mètres sélectionnée avec ses sous-cellules de la Boyer-Nord au 20 m se trouvant à l'intérieur de ses limites, tout en sectionnant les parties des petites cellules qui dépassent. La requête conserve du même coup la table de la cellule de la Boyer-Nord au 125 m jumelée avec celle des cellules de la Boyer-Nord au 20 m. Il s'agit donc de sélectionner la cellule désirée sur la Boyer-Nord au 125 m et d'ouvrir le thème contenant les cellules de la Boyer-Nord au 20 m et leurs attributs. Le "*input theme to intersect* " sera les cellules de la Boyer-Nord au 125 m et le "*overlay theme*" sera les cellules de

la Boyer-Nord au 20 m. Il ne faut pas oublier de cocher la case qui fera en sorte que la seule cellule sélectionnée sera utilisée dans la requête ("*Use selected feature only*"). Il faut faire attention aux cellules qui se répètent dans le résultat de la requête puisqu'une cellule de la Boyer-Nord au 20 m peut avoir été séparée en plusieurs parties à l'intérieur des limites de la cellule de la Boyer-Nord au 125 m.

Pour la Boyer-Nord au 20 m, la moyenne des pentes des groupes de sous-cellules a encore été pondérées par la surface. Concernant l'occupation du sol et la texture de sol prédominantes pour les ensembles de cellules au 20 m, elles ont été calculées à partir des superficies des parties de cellules se trouvant à l'intérieur de la cellule de la BN au 125 m. Ces superficies peuvent être calculées en hectares dans *ArcView* à l'aide d'une extension du nom de *Xtools*. Il faut cependant additionner les superficies pour les parties de cellules sectionnées qui reviennent plus d'une fois à l'intérieur de la cellule de la BN au 125 m. Nous pouvons ainsi pu connaître l'occupation du sol ou la texture de sol couvrant la plus grande superficie sur l'ensemble des cellules de la BN au 20 m se trouvant à l'intérieur de la cellule de la BN au 125 m. Pour ce qui est de la contribution des groupes de cellules de la BN au 20 m en sédiments et en ruissellement, elle a été calculée comme suit :

Pp = (Pt/At) * Ap

Où :

Pp = contribution de la partie de la cellule de la Boyer-Nord au 20 m sectionnée (tonnes/an)

Pt = contribution de la cellule entière de la Boyer-Nord au 20 m (tonnes/an)

At = superficie (ha) de la cellule entière de la Boyer-Nord au 20 m

Ap = superficie (ha) de la partie de la cellule de la Boyer-Nord au 20 m sectionnée

Nous avons ensuite fait la sommation des Pp pour connaître la production totale de l'ensemble des cellules de la BN au 20 m se trouvant à l'intérieur des limites de la cellule de la BN au 125 m. Pour ce qui est de l'azote, nous avons calculé la contribution des cellules différemment :

Pp = (Pt/2/At) * Rt * Ap

Où :

Pp = contribution de la cellule au 20 m sectionnée en tonnes/an

Pt = contribution en azote du sous-bassin de la Boyer-Nord au 20 m en tonnes pour 2 ans

At = superficie (ha) du sous-bassin de la Boyer-Nord au 20 m

Rt = ratio d'azote calculé pour la cellule

Ap = superficie (ha) de la cellule au 20 m sectionnée

Nous appliquons cette équation aux simulation en *Sed N* et *Sol N* puis nous additionnons les Pp trouvés afin de connaître la contribution en azote de l'ensemble des cellules de la BN au 20 m incluses à l'intérieur des limites de la cellule au de la BN au 125 m.

Encore une fois, il n'est pas surprenant d'observer que l'érosion diminue sur neuf cellules sur dix sur la BN au 125 m et que le ruissellement et l'azote augment de manière générale. Nous observons aussi que la pente diminue dans tout les cas, que l'occupation du sol change sur sept cellules sur dix et que la texture du sol reste la même (tableau 7).

Boyer Nord au 125 m		Boyer Nord au 20 m		
# de la cellule	913	Nombre de cellules	58	
Superficie (ha)	258	Superficie moyenne (ha)	7	
Pente (%)	1.9	Pente moyenne (%)	5	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol	Céréales	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Foin	
Érosion (tonnes/an)	89	Érosion tot (tonnes/an)	54	
Ruissellement (m ³ /an)	518 171	Ruissellement tot (m ³ /an)	192 881	
Azote (tonnes/an)	355	Azote tot (tonnes/an)	11	
# de la cellule	931	Nombre de cellules	26	
Superficie (ha)	120	Superficie moyenne (ha)	8	
Pente (%)	1.9	Pente moyenne (%)	4.3	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol	Céréales	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Foin	
Érosion (tonnes/an)	41	Érosion tot (tonnes/an)	97	
Ruissellement (m ³ /an)	234 098	Ruissellement tot (m^3/an)	1181	
Azote (tonnes/an)	160	Azote tot (tonnes/an)	6	
# de la cellule	922	Nombre de cellules	48	
Superficie (ha)	175	Superficie moyenne (ha)	6	
Pente (%)	3.7	Pente moyenne (%)	6.4	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol	Foin	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Foin	
Érosion (tonnes/an)	0.077	Érosion tot (tonnes/an)	55	
Ruissellement (m ³ /an)	315 211	Ruissellement tot (m ³ /an)	133 912	
Azote (tonnes/an)	26	Azote tot (tonnes/an)	9	
# de la cellule	912	Nombre de cellules	18	
Superficie (ha)	48	Superficie moyenne (ha)	4.8	
Pente (%)	3.8	Pente moyenne (%)	6.7	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol	Foin	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Foin	
Érosion (tonnes/an)	0.04	Érosion tot (tonnes/an)	61	
Ruissellement (m ³ /an)	103 486	Ruissellement tot (m^3/an)	58 710	
Azote (tonnes/an)	4	Azote tot (tonnes/an)	5	
# de la cellule	971	Nombre de cellules	27	
Superficie (ha)	182	Superficie moyenne (ha)	8	
Pente (%)	1.4	Pente moyenne (%)	4	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol	Foin	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Maïs	
Érosion (tonnes/an)	0.1	Érosion tot (tonnes/an)	44	
Ruissellement (m ³ /an)	307 919	Ruissellement tot (m ³ /an)	190 707	
Azote (tonnes/an)	12	Azote tot (tonnes/an)	11	

Tableau 7 : Cellules de la BN au 125 m vs les sous-cellules de la BN au 20 m

Analyse de l'effet du changement de résolution matricielle d'un modèle numérique d'altitude sur les performances d'un modèle de simulation de la qualité de l'eau en milieu agricole

Boyer Nord au 125 m		Boyer Nord au 20 m		
# de la cellule	831	Nombre de cellules	21	
Superficie (ha)	91	Superficie moyenne (ha)	11	
Pente (%)	1.1	Pente moyenne (%)	3	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol	Foin	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Forêt	
Érosion (tonnes/an)	0.05	Érosion tot (tonnes/an)	6	
Ruissellement (m ³ /an)	176 594	Ruissellement tot (m^3/an)	110 500	
Azote (tonnes/an)	7	Azote tot (tonnes/an)	6	
# de la cellule	981	Nombre de cellules	42	
Superficie (ha)	103	Superficie moyenne (ha)	3	
Pente (%)	1.1	Pente moyenne (%)	3.9	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol en	Foin	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Maïs	
Érosion (tonnes/an)	0.05	Érosion tot (tonnes/an)	301	
Ruissellement (m ³ /an)	187 068	Ruissellement tot (m^3/an)	99 324	
Azote (tonnes/an)	7	Azote tot (tonnes/an)	4	
# de la cellule	982	Nombre de cellules	35	
Superficie (ha)	120	Superficie moyenne (ha)	6	
Pente (%)	1.2	Pente moyenne (%)	6.6	
l'exture de sol	Loam sableux	l'exture de sol couvrant la plus grande superficie	Laom sableux	
Occupation du sol en	Foin	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Forêt	
Érosion (tonnes/an)	0.07	Érosion tot (tonnes/an)	54	
Ruissellement (m ³ /an)	224 488	Ruissellement tot (m^3/an)	141 571	
Azote (tonnes/an)	· 9	Azote tot (tonnes/an)	6	
# de la cellule	923	Nombre de cellules	40	
Superficie (ha)	107	Superficie moyenne (ha)	6	
Pente (%)	1.6	Pente moyenne (%)	4	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol	Foin	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Maïs	
Érosion (tonnes/an)	0.02	Érosion tot (tonnes/an)	280	
Ruissellement (m ³ /an)	184 438	Ruissellement tot (m^3/an)	255 382	
Azote (tonnes/an)	14	Azote tot (tonnes/an)	9	
# de la cellule	893	Nombre de cellules	44	
Superficie (ha)	161	Superficie moyenne (ha)	8	
Pente (%)	1.1	Pente moyenne (%)	4.7	
Texture de sol	Loam sableux	Texture de sol couvrant la plus grande superficie	Loam sableux	
Occupation du sol	Forêt	Occupation du sol couvrant la plus grande superficie	Forêt	
Érosion (tonnes/an)	0.06	Érosion tot (tonnes/an)	26	
Ruissellement (m ³ /an)	16 503	Ruissellement tot (m^3/an)	144 722	
Azote (tonnes/an)	. 4	Azote tot (tonnes/an)	6	

5.2 Simulations temporelles

Pour la comparaison des données temporelles de la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m, nous avons créé un fichier du nom de "*BN20mvsBN125m_temporel.xls*". Il est à noter que les résultats ont été pris en amont du tronçon 1 pour la Boyer-Nord au 20 m et en amont du tronçon 82 pour la Boyer-Nord au 125 m.

Quand nous comparons les simulations sur une base bisannuelle (1998-1999) (tableau 8), nous constatons que le ruissellement et l'azote simulés de la Boyer-Nord au 125 m sont plus élevés que ceux de la Boyer-Nord au 20 m, ce qui avait aussi été observé pour les simulations spatiales. Pour ce qui est des sédiments en suspension, il y a sous-estimation sur la Boyer-Nord au 125 m en comparaison avec la Boyer-Nord au 20 m, tout comme l'avait démontré les simulations spatiales. Le phosphore, tout comme l'azote, se trouve en plus grande quantité à l'exutoire de la Boyer-Nord au 125 m qu'à celui de la Boyer-Nord au 20 m.

Tableau 8 : Cumulatif des simulations pour 1998 et 1999

Simulations	BN 20 m	BN 125 m
Débit (m ³)	6 509 600	7 275 600
SS tot (tonnes)	1 057	96
N (tonnes)	205	237
P (tonnes)	41	50

Même si les résultats simulés pour la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m sur une période de deux ans s'éloignent quantitativement les uns des autres, il y a tout de même similitude entre leurs variations mensuelles (figure 6). Cette observation ne s'applique cependant pas aux sédiments, puisqu'ils démontrent le plus grand écart entre ce qui a été simulé sur la BN au 20 m et au 125 m. Nous remarquons aussi que les fluctuations du débit et des nutriments sur la Boyer-Nord au 125 m suivent le même patron général sur les deux sous-bassins et cela s'explique puisque les nutriments simulés par le modèle se trouvent en grande partie en solution (*Sol N et Sol P*).

Analyse de l'effet du changement de résolution matricielle d'un modèle numérique d'altitude sur les performances d'un modèle de simulation de la qualité de l'eau en milieu agricole



Figure 6 : Simulations mensuelles à l'exutoire de la BN au 20 m et au 125m

6. Interprétation des résultats et discussion

Grunwald [6] avait observé qu'AGNPS était particulièrement sensible au changement de la résolution des pixels du MNA et que les simulations en sédiments s'en ressentaient davantage que celles du ruissellement et des nutriments. Nous avons fait les mêmes observations sur notre sous-bassin. En effet, le ruissellement et les pertes en nutriments sur la BN au 20 m et au 125 m étaient comparables alors qu'il n'y avait pas de correspondance entre l'érosion simulée avant et après le changement d'échelle.

Dans cette section, nous discuterons donc des facteurs à l'origine des différences dans la simulation des sédiments découlant du changement d'échelle. Le facteur de 20 de différence dans l'érosion sur les cellules pourrait s'expliquer par trois facteurs : la diminution de la pente moyenne des cellules, la disparition du maïs et de séries de sol. Nous allons tout d'abord discuter les différences dans les pentes, de la variation du facteur C de l'équation universelle de perte des sols (*RUSLE*) en lien avec le couvert végétal et finalement, nous aborderons le facteur K de *RUSLE*, qui exprime les risques d'érosion en lien avec les caractéristiques physiques du sol.

6.1 Les pentes

Les pentes sont calculées par le programme *TOPAZ*, qui a été intégré au modèle en association avec d'autres sous-programmes et leur ensemble porte le nom de *TOPAGNPS*. Le calcul de la pente s'effectue tout d'abord pour chacun des pixels, en utilisant l'altitude des quatre coins du pixel par voisinage dans une fenêtre de 3 x 3, soit le D8 (Quentin, p.25). Il est ainsi possible d'obtenir l'inclinaison du pixel et par conséquent, de calculer sa pente. Ensuite, la pente de la cellule est obtenue par la moyenne des pentes des pixels se trouvant à l'intérieur (*AnnAGNPS_Cell. inp*). Nous pouvons donc facilement imaginer que les détails du relief seront mieux représentés par des pixels de 20 m x 20 m que par des pixels de 125 m x 125 m. Pour illustrer ce phénomène, nous avons utilisé les fichiers *Tslope.Arc* créés par *TOPAGNPS* (pour terrain slope). Ils représentent la pente calculée pour les pixels au 20 m et au 125 m (figure 7).

Nous observons que les pixels ayant les plus fortes pentes sur la Boyer-Nord au 20 m se trouvent le long des cours d'eau et que la pente maximale obtenue pour un pixel est de 67%. Sur la Boyer-Nord au 125 m, il est flagrant de voir que la définition du relief est moins précise et qu'il y a diminution des pentes en comparaison avec la Boyer-Nord au 20 m. Les pixels à fortes pentes le long des cours d'eau ont aussi complètement disparu et la pente maximale des pixels ne dépasse pas 20%.



Figure 7 : Pente des pixels avec 20 m et 125 m de résolution

Dans un même ordre d'idée, nous avons cartographié les pente des cellules sur les deux sousbassins (figure 8) et nous observons que celles étant supérieures à 9% sur la Boyer Nord au 20 m se trouvent le long des tronçons et qu'elles couvrent généralement une petite superficie (moyenne de 1.7 ha). Ces cellules aux pentes abruptes n'existent plus après le changement d'échelle. En comparant les pentes des cellules de la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m (tableau 9), nous observons que 79% des cellules de la Boyer-Nord au 125 m ont des pentes de 0% à 3% alors qu'aucune cellule ont une pente supérieure à 6%. Sur la Boyer-Nord au 20 m, 45% des cellules (33% de la superficie du sous-bassin) ont une pente supérieure à 6%. Il est aussi intéressant de voir que les pentes qui contribuent le plus à l'érosion sont celles qui sont les plus élevées sur la Boyer-Nord au 20 m (de 9 à 18 %) alors que sur la Boyer-Nord au 125 m, la faible variation des pentes ne semble pas influencer les pertes en sédiments.



Figure 8 : Pentes des cellules de la BN au 20 m et au 125 m

Page 25

	BN 20 m					
Pente	Nb	% de	Superficie	% de	Érosion sur	% de
(%)	de cellule	cellule	(ha)	la superficie	les cellules (Kg/ha/an)	l'érosion totale
0 à 3	150	32	867	33	0.3	9
3 à 6	106	23	910	34	2	45
6 à 9	92	20	634	24	1	16
9 à 12	41	9	119	4	4	16
12 à 15	49	11	107	4	3	12
15 à 18	19	4	15	1	5	2
18 à 21	5	1	3	0.1	1	0.06

) m et au 125 m
(

BN 125 m						
Pente (%)	Nb de cellule	% de cellule	Superficie (ha)	% de la superficie	Érosion sur les cellules (Kg/ha/an)	% de l`érosion totale
0 à 3	30	79	2142	77	0.06	89
3 à 6	8	21	658	23	0.03	11
6 à 9	0	0	0	0	0	0
9 à 12	0	0	0	0	0	0
12 à 15	0	0	0	0	0	0
15 à 18	0	0	0	0	0	0
18 à 21	0	0	0	0	0	0

Le profil de la pente du cours d'eau principal retrouvé sur la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m (figures 9 et 10) suit la même tendance générale. Cependant, la courbe de la Boyer-Nord au 20 m illustre mieux le relief puisqu'elle présente plus de variations que celle de la Boyer-Nord au 125 m. Les sédiments connaissent d'avantage d'étapes de sédimentation et de remise en transport dans le cours d'eau principal de la BN au 20 m que dans celui de la BN au 125 m.



Figure 9 : Cours d'eau principaux utilisés sur les deux sous-bassins pour tracer leur profil



Figure 10 : profil du cours d'eau principal sur la BN au 20 m et au 125 m

De plus, le facteur LS, qui se rapporte aux risques d'érosion en lien avec la pente des cellules, est calculé par le modèle et se trouve dans le fichier *AnnAGNPS_Cell.dat*. Nous l'avons donc comparé une fois pondéré par la surface et nous remarquons qu'il varie d'un facteur de 3.5 entre les deux sous-bassins.

Rappelons-nous que nous avons choisi de combiner un MNA de 125 m de résolution et un aire critique de drainage de 100 ha pour la simulation d'un bassin versant synthétique ayant un réseau hydrographique optimal, en se basant sur les travaux de Quentin. Puisque la grosseur du pixel influence directement la représentation des pentes et que la pente de la cellule est obtenue par la moyenne des pentes des pixels, il est peut-être plus approprié d'utiliser une résolution de pixel supérieure au détriment de représenter le mieux possible le réseau hydrographique. Les pixels obtenus seraient plus petits et pourraient mieux représenter les pentes, ce qui améliorait les simulations en érosion.

Il ne faut cependant pas oublier que les deux échelles utilisées ne représentent pas le même phénomène. En effet, les pixels au 20 m sont assez petits qu'ils permettent de simuler l'érosion sur les berges apiques se trouvant le long des cours d'eau. Ces berges, fréquemment creusées mécaniquement et non protégées par la végétation, sont souvent pointées du doigts comme étant responsables de la pollution en sédiments retrouvée dans les cours d'eau. Avec l'utilisation de pixels plus grands, le phénomène d'érosion des berges n'est plus représenté donc les pertes en sédiments simulées ne peuvent qu'être le résultat du travail des champs. Les deux échelles sont donc utilisables mais elles ne représentent pas la même réalité. Lorsqu'il faudra conseiller les agriculteurs pour l'amélioration de leur pratiques agricoles pour enfreindre l'érosion des sols, les pertes en sédiments simulées à l'échelle de la Boyer-Nord au 125 m seraient plus appropriées.

6.2 L'occupation du sol

Comme nous l'avons vu précédemment, les champs de maïs disparaissent sur la Boyer-Nord au 125 m puisque la source d'attribution de l'occupation du sol n'était pas la même pour les deux échelles. Afin de connaître l'impact qu'avait la disparition des champs de maïs sur l'érosion, nous avons comparé le facteur C de RUSLE des deux sous-bassin. Ce facteur a été calculé par le modèle mais il n'était pas possible d'en avoir les sorties. Il a donc fallu le calculer manuellement. Le facteur C varie en fonction de l'évolution du couvert végétal dans le temps donc nous l'avons calculé pour chaque culture pour sept dates au cours de la saison végétative. Ensuite, nous avons trouvé le facteur C moyen des deux sous-bassins pour chaque date en pondérant les valeurs attribuées aux cellules par leur surface. Afin de comparer les résultats sur une base bisannuelle pour la BN au 20 m et au 125 m, nous avons fait la moyenne des facteur C pondéré par la surface des sept dates. Nous observons que le facteur C présente une différence d'un facteur de presque 4 entre la Boyer-Nord au 20 m et au 125 m. Il est aussi à noter que le maïs présentait le facteur C moyen le plus élevé (tableau 11). Il est donc normal de voir les risques d'érosion diminuer sur la Boyer-Nord au 125 m puisque le maïs a été remplacé par des occupations du sol ayant un facteur C plus faible, tel le foin.

Tableau 10 : Facteur C moyen des cultures pour les deux années de simulation

Culture	Facteur C moyen 1998 & 1999
Maïs	0.04
Céréales	0.03
Foin	0.007

6.3 Les séries de sol

Nous avons vu que cinq séries de sol avaient disparu avec le changement d'échelle. Le facteur K de RUSLE indique les risques d'érosion d'un sol en fonction de ses paramètres physiques. Il devait être défini pour chaque série de sol dans l'éditeur d'entrée. Une fois comparé après avoir été pondéré par la surface des cellules, nous remarquons qu'il ne change pas de la Boyer-Nord au 20 m à la Boyer-Nord au 125 m. La disparition des séries de sol sur la BN au 125 m ne joue donc pas un rôle important dans les différences dans les pertes en sédiments.

7. Conclusion

Les simulations spatiales obtenues après le changement d'échelle des données d'entrée sont valables pour définir les cellules les plus à risque. Les simulations temporelles nous indiquent qu'une étude par sous-bassin versant de la rivière Boyer est possible pour l'évaluation qualitative des fluctuations mensuelles du débit et des pertes en nutriment. Les simulations spatiales et temporelles en ruissellement et en nutriments obtenues pour la Boyer–Nord au 125 m demeurent comparables à ce qui avait été trouvé pour le sous-bassin versant bien documenté. L'érosion, pour sa part, diminue significativement avec le changement d'échelle, dû au changement dans les pentes et à la disparition du maïs. La diminution des pentes sur la Boyer-Nord au 125 m est directement influencée par la résolution des pixels et la disparition du maïs s'explique par la source utilisée pour l'attribution d'une occupation du sol aux cellules.

Les deux échelles utilisées sont valables mais seulement, elles ne représentent pas le même phénomène pour l'érosion. La Boyer-Nord au 20 m inclue l'érosion linéaire, soit celle qui provient des berges alors que la Boyer-Nord au 125 m relate seulement l'érosion superficielle, soit celle retrouvée sur les champs. Par conséquent, le choix de l'échelle pour les simulations est primordial et il doit être fait en fonction de l'information que nous voulons obtenir. Pour les simulations de la Boyer, il serait pertinent de trouver l'échelle qui nous permettrait d'obtenir l'érosion superficielle, tout en ne perdant pas d'occupation du sol.

8. Références

[1] Garbrecht, J. & Martz, L. W. (1997) *TOPAZ*: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization. *TOPAZ Overview*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS), Grazinglands Research Laboratory, ARS Publication No. GRL 97-2: El Reno, OK, 21 pp.

[2] Quentin, E. (1999) Optimisation des paramètres de la procédure géomatique d'extraction des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant à partir d'une modèle numérique d'altitude. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 116 p.

[3] Racine, M.-J. (2001) Application d'AnnAGNPS2001 au bassin versant de la rivière Boyer pour une modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole. Rapport de stage, Université de Sherbooke & INRS-Eau, 55 p.

[4] Chardonneau, G. (2000) AnnAGNPS98, de la simplicité d'un modèle à la complexité du terrain : la modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole sur un bassin versant du Québec. Rapport de stage, INRS-Eau, Québec, 96 p.

[5] Proulx, S.(2002) Amélioration des paramètres d'entrée pour l'application du modèle AnnAGNPS au bassin versant de la rivière Boyer. Rapport de recherche, INRS-ETE.

[6] Grundwald, S. (1997) GIS-gestuetzte Modellierung des Landschaftswasser-und Stoffhaushaltes mit dem Modell AGNPSm. Ph.D. Dissertation, Department of Natural Ressources Management, Giessen University, Boden und Landschaft.