

Appui au SCHAPI 2011 - Module 2 : Comportement Hydrodynamique des bassins versants

Rapport final

BRGM/RP-60499-FR
Décembre 2011

Appui au SCHAPI 2011 - Module 2 : Comportement Hydrodynamique des bassins versants

Rapport final

BRGM/RP-60499-FR
Décembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011 11RISI01

A. Hohmann, M. Delmas, O. Cerdan, V. Mardhel

Vérificateur :

Nom : Desprats J.F.

Date : 16/12/2011

Signature :

Approbateur :

Nom : Foerster E.

Date : 20/12/2011

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés :

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

A. Hohmann, M. Delmas, O. Cerdan, V. Mardhel. 2011. Appui au SCHAPI 2011 - Module 2 : Comportement Hydrodynamique des bassins versants. Rapport final. BRGM/RP-60499-FR

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la convention entre le BRGM et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), trois axes de travail ont été définis pour l'année 2011 :

- L'application de l'indicateur karst sur deux bassins versants sélectionnés parmi les propositions de plusieurs SPC
- **L'intérêt la caractérisation du comportement hydrodynamique des BV basée sur l'Indicateur de Persistance des réseaux**
- le rattachement de l'étude sur les remontées de nappe faite pour le compte du SPC Artois – Picardie sur le site expérimental de Warloy Baillon (Hallue) ainsi que la modélisation maillée du bassin de l'Hallue.

Ce programme de travail est financé à 80% par la DGPR, et à 20% par le BRGM dans le cadre de ses actions de Services Publics.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIFS DU MODULE 2.....	9
2. Matériels et méthodes	11
2.1. LES BASES DE DONNEES	11
2.1.1. Origine et nature des données de base	11
2.1.2. Les données de pluie	11
2.1.3. Les données de débit journaliers.....	12
2.1.4. Le MNT IGN à 25m	13
2.1.5. La lithologie	13
2.1.6. L'occupation du sol (OCS).....	13
2.1.7. L'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux) au pas de 50 m.....	14
2.1.8. Le réseau hydrographique : BD CARTHAGE©.....	15
2.2. LES TRAITEMENTS.....	15
2.2.1. Constitution d'un MNT France à 25 m.....	16
2.2.2. Calcul de l'IDPR au pas de 25 m.....	17
2.2.3. La sélection des stations de débits hydriques	21
2.2.4. Délimitation des bassins versants	22
2.2.5. Calcul des statistiques zonales	25
2.2.6. Calcul des pluies pondérées et mise en corrélation avec les données de débits journaliers	27
2.2.7. Calcul des débits et des coefficients de ruissellement	28
3. Résultats	31
4. Conclusions	37
5. Références bibliographiques	39

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Schéma conceptuel présentant la méthodologie appliquée	16
Figure 2 : Carte de l'IDPR à 25 m de résolution sur la France.....	19
Figure 3: Cartes comparatives des valeurs d'IDPR obtenues à 25 m et 50m de résolution	20
Figure 4 : Surfaces cumulées des différentes classes d'IDPR à l'échelle nationale au pas de 25m et 50m.....	21
Figure 5: Boite à Outils personnalisée (ArcGIS) pour la semi-automatisation de la délimitation des bassins versants et le calcul des statistiques zonales	23
Figure 6 : Comparaison des tracés d'un BV calculés à partir des deux MNTs	24
Figure 7 : Carte des 102 bassins versants à l'échelle nationale	25
Figure 8 : Hyétogramme et hydrogramme d'un évènement pluie-débit : prise en compte de l'écoulement de surface (Delmas, 2011)	29
Figure 9 : histogramme de fréquence des coefficients de ruissellement calculés	31
Figure 10 : Variabilité des coefficients moyens de ruissellements en fonction des saisons.....	32
Figure 11 : Relation entre le coefficient de ruissellement moyen et de printemps et l'altitude moyenne des bassins versants.....	33
Figure 12 : Relation entre le coefficient de ruissellement moyen et l'IDPR.	34
Figure 13 : Relation entre le coefficient de ruissellement moyen et l'IDPR pour les pentes inférieures ou égales à 5%.	35
Figure 14 : Relation entre le coefficient de ruissellement moyen et l'IDPR pour les altitudes moyennes inférieures à 200m.....	36
Tableau 1. Récapitulatif des données acquises et de leur source.....	11
Tableau 2: Caractéristiques des données SAFRAN	12
Tableau 3 : Echelle de valeurs de l'IDPR et interprétation.....	18
Tableau 4 : Comptage des BVs par modalité d'OCS	26
Tableau 5: Comptage des BVs par modalité de Litho.....	27

Liste des annexes

Annexe 1 Liste des stations hydriques sélectionnées	41
Annexe 2 Boite à outils (ArcGIS, Model Builder) pour la semi-automatisation de la délimitation des bassins versants et le calcul des statistiques zonales.....	47
Annexe 3 Illustration du découpage sous SIG des BVs selon la grille météo SAFRAN	51

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

La définition du programme de travail 2011 s'est faite lors d'échanges menés fin 2010 et début 2011 exprimant :

- L'application de l'indicateur karst sur deux bassins versants sélectionnés parmi les propositions de plusieurs SPC
- L'intérêt de la caractérisation du comportement hydrodynamique des BV basée sur l'Indicateur de Persistance des réseaux (IDPR). C'est ce deuxième module qui est détaillé dans ce rapport.
- la remontée de nappe pour le compte du SPC Artois – Picardie sur le site expérimental de Warloy Baillon (Hallue) ainsi que la modélisation maillée du bassin de l'Hallue.
- La finalisation du programme BVNE

1.2. OBJECTIFS DU MODULE 2

Parmi les indicateurs étudiés en 2010, l'indice de persistance des réseaux (IDPR, Mardhel et al, 2004) apparaît être le plus prometteur pour une utilisation en opérationnel. L'IDPR est utilisé pour qualifier l'aptitude du milieu à laisser ruisseler ou s'infiltrer la lame d'eau météoritique. L'idée qui sous-tend cette approche découle du paradigme suivant : *l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent.*

L'IDPR peut donc être utilisé pour quantifier indirectement la fonction de transfert des précipitations depuis la surface vers le sous-sol. Il compare un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (indice de développement ID), au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (de persistance des réseaux PR). Il présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux et rend compte du rôle du milieu souterrain dans l'établissement du réseau hydrologique et va alors être exploité pour approcher de manière indirecte, la capacité intrinsèque des terrains à connecter le ruissellement de surface au réseau hydrologique pérenne.

L'objectif général de ce module est d'analyser dans quelle mesure il est possible de caractériser le comportement hydrodynamique des BV à partir de l'IDPR pour un échantillon de bassins versants répartis sur l'ensemble du territoire français.

L'IDPR est disponible à ce jour sur tout le territoire français, basé sur le MNT IGN à 50m de résolution et une ancienne version (2007) de la banque de données BD

Carthage (tracé des cours d'eaux) ; la première étape de ce module consistera donc à actualiser la cartographie nationale de l'IDPR sur la base :

- du MNT à 25m de résolution de l'IGN, fourni par le SCHAPI dans le cadre d'une convention de mise à disposition et
- de la dernière version de la BD Carthage.

2. Matériels et méthodes

2.1. LES BASES DE DONNEES

2.1.1. Origine et nature des données de base

L'ensemble des données nécessaires à cette étude sont d'origine et de nature diverses (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les données acquises ont été intégrées dans le SIG.

Thématique	Donnée acquise	Type	Source
Eau	Réseau hydrographique	Polylignes	IGN (BD CARTHAGE®) 2010
	Débit hydrique journalier par station	Fichier txt	MEEDDM (Banque Hydro)
Topographie	MNT	Grille raster	IGN (BD ALTI®)
Géologie	Lithologie	Grille raster	BRGM
	IDPR au pas de 50m	Grille raster	BRGM
Météo - Climato	Pluie et neige journalières	Mailles	Météo France
Occupation du sol	Couvert végétal	Grille raster	MEEDDM (CLC2006)

Tableau 1. Récapitulatif des données acquises et de leur source

2.1.2. Les données de pluie

La base de données météorologique complète SAFRAN a été décrite par Le Moigne (2002), il s'agit de données produites par Météo-France (Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM) à partir d'observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres horaires (température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident). La base SAFRAN fournit des données journalières de pluie, de neige et d'évapotranspiration (en mm) depuis 1970, sur une grille régulière de 8x8 km.

Dans le cadre de l'étude, Météo France a fourni au BRGM par l'intermédiaire du SCHAPI les données météorologiques sur deux DVDs (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Type de données	Pluie et neige (Correspond aux pluviomètres interpolés par krigeage)
Zone	France métropolitaine
Période	Début 1998 à fin 2010 - Pas de temps qui est de 24h (6hTU à 6hTU)
Format	ASCII GRID (une grille par jour)
Résolution	Maille de 8 kms
Système de Projection	NTF Lambert II étendu (méridien de Greenwich) (système attribué aux grilles par déduction car non précisé dans les métadonnées)

Tableau 2: Caractéristiques des données SAFRAN

Ces données ont demandé un important travail de mise en forme avant traitement sous MATLAB.

2.1.3. Les données de débit journaliers

Les données journalières de débits hydriques ont été collectées à partir de la Banque HYDRO qui compte un très grand nombre de stations en France avec des mesures depuis le début du 20^{ème} siècle pour certaines d'entre elles. La banque de données HYDRO contient des informations sur les débits et les hauteurs d'eau pour de nombreuses stations de mesures. Les données qui sont accessibles via internet par l'application HYDROWEB à l'adresse (<http://www.hydro.eaufrance.fr>), proviennent de différents services et y sont centralisées. Dans la majorité des cas, il s'agit de services de l'Etat (Directions Départementales de l'Agriculture et de la Forêt, Agences de l'Eau, organismes de recherche...) et de compagnie d'aménagement (la Compagnie Nationale du Rhône par exemple). Ces producteurs sont responsables de l'installation des stations de mesure en rivière, de la maintenance, du recueil de données et de leur vérification. La qualité des données dépend donc du producteur de la donnée lui-même.

Cette banque de données HYDRO stocke les données concernant 3500 stations de mesure (actuellement 2400 sont en service). Pour chaque station, les débits instantanés, journaliers, mensuels sont calculés à partir des valeurs de hauteur d'eau et de courbes de tarage. Ces valeurs sont actualisées à chaque mise à jour d'une hauteur ou d'une courbe de tarage. C'est le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), service du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, qui administre la banque et gère les services associés à l'application HYDRO 2. Pour cette étude, les données sur les débits des stations de mesure en France proviennent donc de cette banque de données.

Dans le cadre de l'étude, le SCHAPI a fourni au BRGM les CD d'installation du logiciel HYDRO II version 2.3 ainsi que des identifiants de connexion permettant d'accéder aux données de la banque hydro. Ce logiciel offre des traitements supplémentaires qui ne sont pas aujourd'hui accessibles via l'interface Internet de la banque HYDRO.

2.1.4. Le MNT IGN à 25m

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et avec la morphologie du bassin.

Au moyen d'une convention passée entre l'IGN et le BRGM, nous avons pu disposer du MNT issue de la BD TOPO® (Thème Altimétrie, 2008) sur la France entière. Ce modèle numérique de terrain se présente sous la forme d'une grille régulière, au pas de 25 m, déduite des courbes de niveau et des points cotés archivés. Ces données (fichiers .asc et md5) ont été fournies sur support DVD.

Nous verrons dans la seconde partie de ce chapitre que le MNT permet de générer plusieurs couches déterminantes pour la caractérisation des bassins versants.

2.1.5. La lithologie

La lithologie est l'étude de la nature des roches issues d'une formation géologique. La nature des roches intervient dans les modifications du relief :

- La nature physique : épaisseur, dureté, compétence, perméabilité, porosité,
- La nature chimique : sensibilité à la dissolution, qualité des eaux interstitielles, phénomènes de cristallisation ou de diagenèse.

En fonction de la lithologie, le comportement du réseau hydrographique et son organisation vont être différents.

La carte lithologique simplifiée utilisée ici est celle produite par le BRGM représentant les roches dominantes du sous-sol en France à l'échelle du millionième.

2.1.6. L'occupation du sol (OCS)

Le couvert végétal retient, selon sa densité, sa nature et l'importance de la précipitation, une proportion variable de l'eau atmosphérique. Cette eau d'interception est en partie soustraite à l'écoulement.

La forêt, par exemple, intercepte une partie de l'averse par sa frondaison. Elle exerce une action limitatrice importante sur le ruissellement superficiel. La forêt régularise le débit des cours d'eau et amortit les crues de faibles et moyennes amplitudes. Par contre, son action sur les débits extrêmes causés par des crues catastrophiques est réduite. A l'inverse, le sol nu, de faible capacité de rétention favorise un ruissellement

très rapide. L'érosion des sols va généralement de pair avec l'absence de couverture végétale.

L'occupation du sol est une des caractéristiques physiques d'un BV influençant fortement sa réponse hydrologique ; par conséquent, nous avons intégré dans notre SIG la base de données d'occupation du sol nationale datée de 2006 suivant la nomenclature CORINE Land Cover en 44 postes en format raster (CLC2006). Cette couche a été réalisée par addition des bases CLC2000 révisée et des changements d'occupation du sol de 2000-2006.

2.1.7. L'IDPR (Indice de Développement et Persistance des Réseaux) au pas de 50 m

Le réseau hydrographique peut être appréhendé comme un objet morpho structural dont la genèse montre des corrélations entre causes et formes. L'IDPR s'intéresse à ces corrélations et met en exergue celles qui sont supposées d'ordre géologique. Arbitrairement, cette approche minimalise les autres facteurs et cela même si le climat (paléoclimat), la végétation, l'action de l'homme ont un rôle important dans l'évolution du tracé des cours d'eau.

Ainsi dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, de perméabilité nulle, seule la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau. La recherche des talwegs qui, par la gravité, rassemblent les eaux de ruissellement, doit donc conduire à la reproduction du réseau hydrographique. Dans la réalité, ce réseau hydrographique théorique diffère du réseau naturel et cette différence traduit la complexité du milieu naturel.

Pour construire cet indice, Mardhel (2004) considère que la densité de drainage est un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, présentera souvent une densité de drainage élevée.

La comparaison entre le réseau de drainage théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (indice de développement, **ID**) et le réseau naturel qui s'est mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (de persistance des réseaux, **PR**) est à la base du calcul de l'IDPR. Ce dernier résulte donc du rapport, pour tout point de l'espace étudié, entre :

- La distance au plus proche cours d'eau réel,
- La distance au plus proche cours d'eau calculé.

L'IDPR au pas de 50 m sur la France métropolitaine est une couche produite par le BRGM. Cette couche a été chargée dans le SIG afin de pouvoir établir ensuite une analyse comparative avec l'IDPR au pas de 25 m calculé dans le cadre de cette étude.

Pour le calcul de cet indice, le réseau hydrologique naturel provient des données de la BD CARTHAGE® pour le réseau hydrographique réel. Le tracé du réseau théorique des écoulements est fondé sur l'analyse des thalwegs : il suppose une lame d'eau météoritique et un récepteur imperméable homogène. Il est établi à partir de l'analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT). L'IDPR résulte alors du rapport, pour tout point de l'espace étudié, entre la distance au plus proche cours d'eau calculé et la distance au plus proche cours d'eau réel.

2.1.8. Le réseau hydrographique : BD CARTHAGE®

La Base de Données CARTHAGE (CARtographie THématique des AGences de l'Eau et du ministère de l'Environnement) est le référentiel national hydrographique.

La BDCARTHAGE® s'appuie sur des données cartographiques de la BD CARTO® et complète cette dernière par des informations de codification hydrographique. Comme pour la BD CARTO, elle est donc conçue pour une échelle d'utilisation allant du 1/50 000 au 1/100 000.

Les cours d'eau de la BD Carthage sont représentés par une succession de tronçons linéaires renseignés des attributs qui les caractérisent (largeur, navigabilité, nom des cours d'eau,...). Les plans d'eau et les zones humides sont représentés par une juxtaposition de polygones fermés.

2.2. LES TRAITEMENTS

Les données acquises nécessitent une vérification, une homogénéisation et une mise en forme en vue de pouvoir les traiter dans un SIG. Le système de projection cartographique de référence choisi pour cette étude est le RGF 1993 Lambert 1993 (méridien de Greenwich).

La réalisation de ce module demande la manipulation de gros volumes de données ainsi qu'une interaction permanente entre le SIG permettant de résoudre les problèmes d'ordre spatiaux et différents environnements de développement (MATLAB et FORTRAN) pour les calculs hydro. L'ensemble de ces échanges a donc été formalisé dans un schéma conceptuel présenté ci-dessous dans la Figure 1.

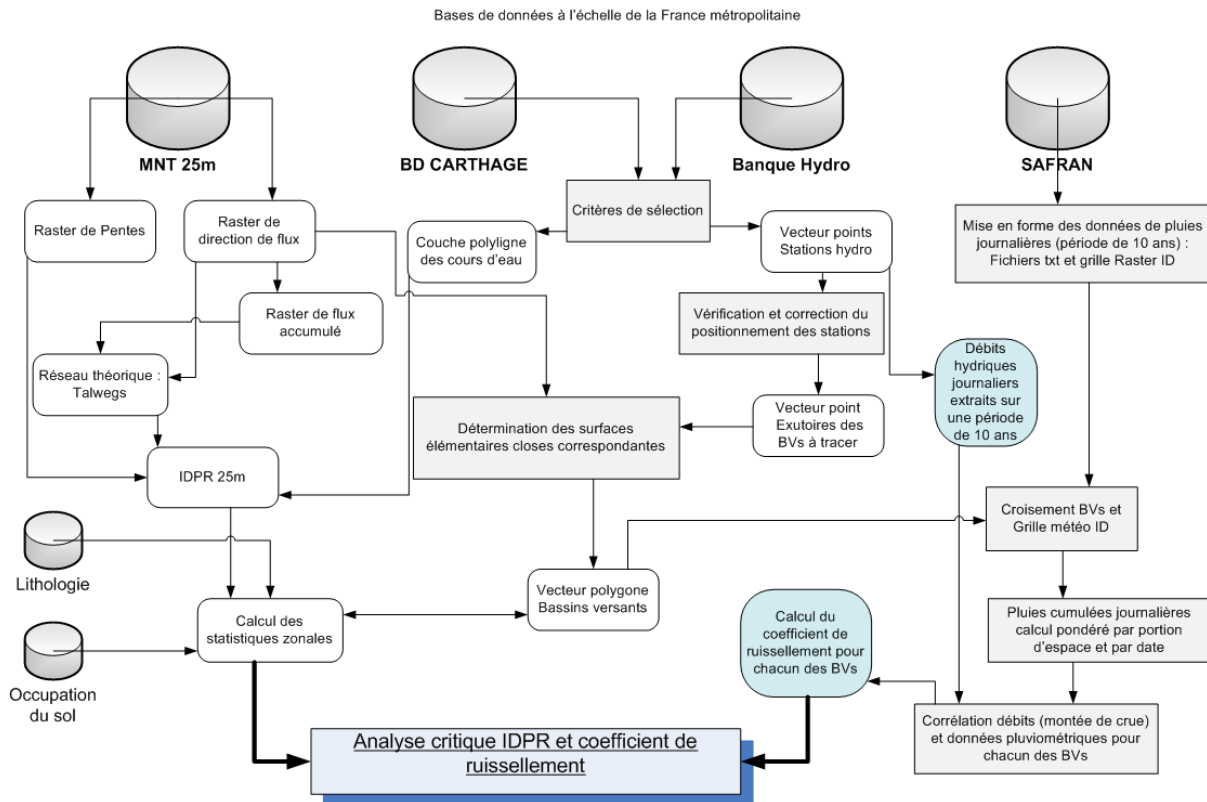


Figure 1 : Schéma conceptuel présentant la méthodologie appliquée

Le chapitre ci-dessous permet de décrire dans un premier temps la préparation de certaines données puis dans un second temps les différents traitements réalisés sur ces dernières afin d'obtenir le résultat souhaité.

2.2.1. Constitution d'un MNT France à 25 m

Le MNT 25 m a été livré non mosaïqué, une dalle par département. La première étape traitement réalisée sur ce MNT fut donc le mosaïquage de l'ensemble des dalles en un seul et unique raster représentant la France métropolitaine. Ce traitement SIG est assez long car il nécessite la manipulation d'un gros volume de données.

Au début de chaque analyse hydrologique, la correction et la précision du MNT doivent être garanties. En général, la majeure partie des données altimétriques issues des MNT est précise ; cependant il peut subsister des dépressions pour lesquelles aucun exutoire n'est possible ou des zones planes pour lesquelles la détermination d'un talweg s'avère impossible ; il est alors nécessaire de traiter ces zones afin de rétablir l'écoulement potentiel. Le but de l'extraction automatique du réseau théorique étant de présenter un réseau continu de largeur constante, ceci exige un traitement de ces dépressions et de ces zones plates.

Pour supprimer les dépressions, il existe plusieurs solutions dont les deux les plus utilisées sont (1) l'inversion du chemin d'écoulement des eaux entre le fond de la dépression et son exutoire en rétablissant la continuité du réseau [Fairfield et Leymarie, 1991] et (2) le comblement de la dépression [Jenson et Domingue, 1998].

La solution retenue pour le traitement des dépressions est le comblement de la dépression. Cette technique prend le nom de « bouche-trous ». L'altitude de l'exutoire de la dépression est affectée à toutes les cellules de la dépression.

Le problème des zones plates, peut se régler d'une manière quasiment similaire au traitement des dépressions. Les algorithmes de traitement visent à concentrer les écoulements au centre de la partie plane afin d'empêcher la création de lac et la dispersion irréaliste des eaux.

2.2.2. Calcul de l'IDPR au pas de 25 m

Le calcul au pas de 25 m à l'échelle de la France entière a demandé un travail important de préparation de données, ainsi que des temps de calcul assez long.

Le réseau naturel

Le réseau hydrologique naturel provient de la BD CARTHAGE version 2010. Pour les besoins du calcul, cette version de la BD a été complétée par une analyse des brins principaux de chacun des cours d'eau afin de ne garder qu'un seul axe d'écoulement. Cette analyse du chaînage des cours d'eau permet d'écarter les brins alternatifs et donc d'affiner le calcul de l'IDPR.

De plus une sélection est faite sur un attribut d'origine de la BD CARTHAGE qui est le champ « nature » dont le domaine de valeur permet de marquer le caractère naturel ou artificiel du cours d'eau

Code	Valeur
0	Sans objet
1	Cours d'eau naturel
2	Canal, chenal
3	Aqueduc, conduite forcée
4	Estuaire
5	En attente de mise à jour
6	Autre valeur

Les codes 2 et 3 ont été écartés pour le calcul.

Le réseau théorique des écoulements

L'extraction du réseau théorique pratiqué dans cette étude se base sur le suivi du ruissellement de l'eau. C'est une méthode hydrologique qui s'appuie sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chacun des pixels à partir des valeurs altimétriques du MNT, par simulation de l'écoulement de l'eau en surface, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente (talweg) [Demargne, 2001].

Le réseau des talwegs est classé selon l'ordre de Strahler. Il présente 6 ordres ; le nombre 1 constitue le premier ordre et le nombre 6 constitue le sixième ordre. Ce dernier constitue le dernier segment qui collecte la quantité d'eau ruisselée tout le long du réseau hydrographique.

Les pentes

La pente du terrain a été créée à partir du traitement du MNT au pas de 25 m. Les valeurs de pentes sont obtenues en pourcentage. Pour un pixel donné, on prend la pente la plus forte avec l'un des huit pixels situés autour.

La pente définit une direction puis une inclinaison ; elle est un élément déterminant dans l'orientation et l'organisation des cours d'eau.

Le résultat de l'IDPR

L'IDPR permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à infiltrer ou ruisseler les eaux de surfaces, à l'échelle des versants. Il varie selon une échelle comprise entre 0 et 2000. Par souci de simplification, l'IDPR est arbitrairement multiplié par 1000 et limité à 2000 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, Figure 2).

IDPR	Interprétation	
<1000	Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement superficiel	L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel.
= 1000	Infiltration et ruissellement superficiel de même importance	Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les axes hydrologiques en place.
1000 à 2000	Ruissellement majoritaire par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain	Le réseau de drainage naturel est de densité supérieure à celui du réseau des talwegs.
> 2000	Majoritairement assimilable à des milieux humides	Ces valeurs d'IDPR traduisent une stagnation permanente ou transitoire des eaux, l'imperméabilité de terrains naturels ou bien des terrains saturés en eau. Les zones d'IDPR supérieures à 2000 sont assimilées à des milieux humides.

Tableau 3 : Echelle de valeurs de l'IDPR et interprétation

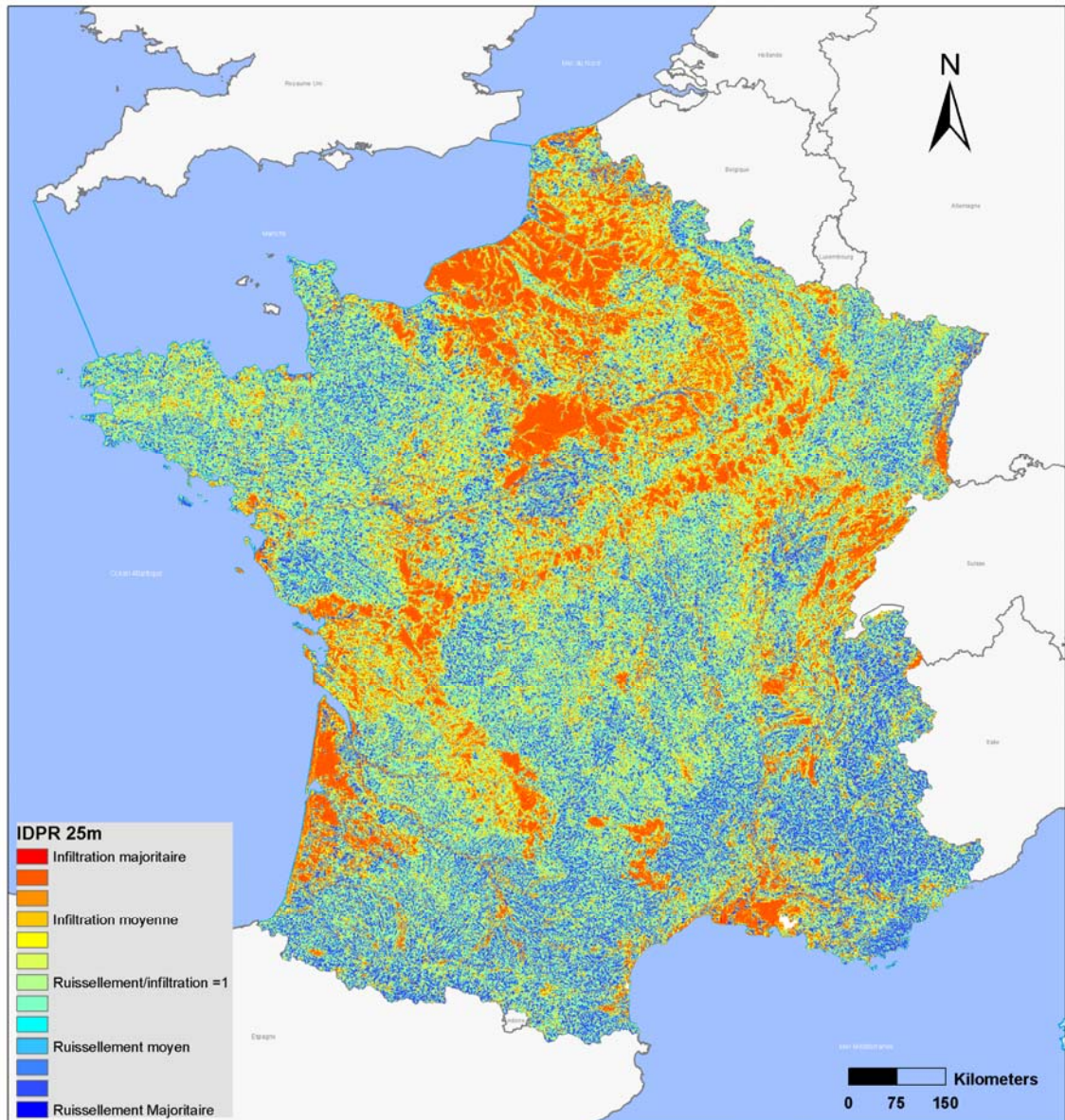


Figure 2 : Carte de l'IDPR à 25 m de résolution sur la France

Analyse comparative des valeurs d'IDPR au pas de 25m et 50 m

Une analyse comparative entre plusieurs IDPRs calculés à partir de MNT à différentes résolutions sur de petites zones a déjà été effectuée dans le rapport final d'appui au SCHAPI de décembre 2010 (Rapport BRGM RP-59216-FR). Les raisons des différences observables sont ici les mêmes que celles présentées dans le rapport de 2010.

L'IDPR étant fondé sur la comparaison du réseau hydrographique et des talwegs, les premiers écarts entre les deux IDPR proviennent principalement du réseau de talweg déterminé à partir du MNT. Les écarts peuvent provenir également des erreurs d'altitude du MNT ainsi que du réseau hydrographique naturel. Ce dernier est issu de la même base de données pour les deux calculs (BD Carthage dont l'échelle de validité maximale est le 1/50000). Mais les versions de la BD Carthage n'étaient pas identiques : l'IDPR 50m utilise la BD Carthage version 2007 et IDPR 25 m la version 2010.

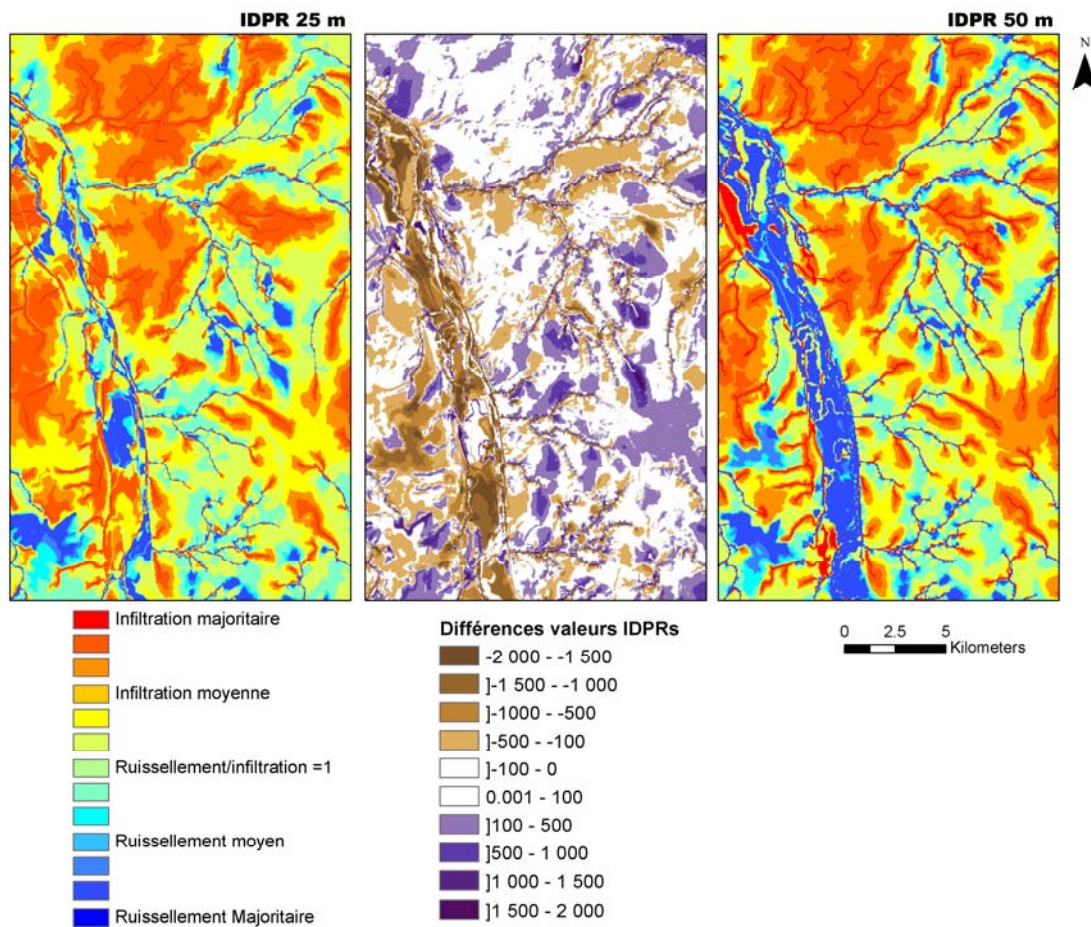


Figure 3: Cartes comparatives des valeurs d'IDPR obtenues à 25 m et 50m de résolution

Dans le graphique ci-dessous, nous avons reclassé les valeurs d'IDPR selon 5 classes afin de mieux les comparer.

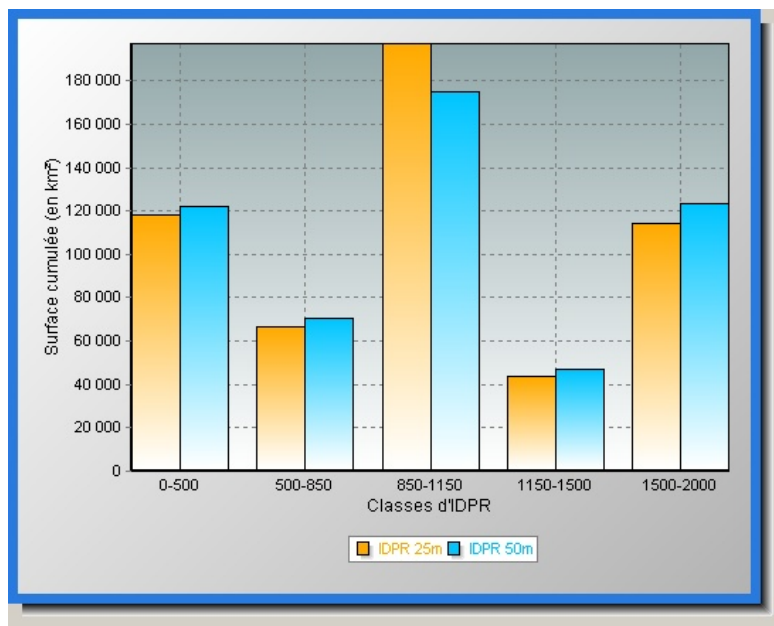


Figure 4 : Surfaces cumulées des différentes classes d'IDPR à l'échelle nationale au pas de 25m et 50m

La Figure 4 montre que pour les deux rasters d'IDPR à 25m et 50m, la répartition des surfaces cumulées entre le pôle ruisselant (1150 à 2000) et infiltrant (0 à 850) et les zones intermédiaires (infiltrant/ruisselant) est parfaitement homogène à l'échelle nationale.

Cette analyse comparative des deux IDPRs est approfondie dans ci-après à l'échelle des bassins versants.

2.2.3. La sélection des stations de débits hydriques

Une première sélection de 100 bassins versants tracés par le BRGM a été présentée au SCHAPI lors de la réunion d'avancement du 12 mai 2011. La sélection a ensuite été modifiée suite à la prise en compte des propositions du SCHAPI (demandant un ajout de BVs dans les secteurs ayant des problématiques de crues rapides comme (1) le nord de la Bretagne, (2) extrêmes sud-ouest et piémont pyrénéen, (3) Extrême Sud-est, (4) la région des Alpes, (5) la zone de la Meuse-Moselle, (6) le secteur Rhin-Sarre, (7) le Poitou-Charentais et une diminution du nombre de bassins versants dans le Gard, la Drôme, le Nord, la Somme, la Seine-maritime) combinées avec nos critères de sélection qui sont les suivants :

1. Date de mise en service avant Janvier 2000
2. Station toujours en service
3. Surface du BV < 1000 km²

4. Critère de distance par rapport au réseau naturel de la BD CARTHAGE (<70 mètres) car nous avons constaté que certaines stations pouvaient avoir des coordonnées géographiques anormalement éloignées du cours d'eau concerné.

Au final, l'échantillon sélectionné pour cette étude comporte 102 stations de mesures de débits. La liste de ces stations peut être consultée en Annexe 1 de ce rapport.

2.2.4. Délimitation des bassins versants

Sachant que le réseau réel des cours d'eau n'est pas toujours égal au réseau théorique, cela signifie que les stations situées sur les cours d'eau réels ne sont pas toujours au fond des thalwegs, ce qui est alors problématique pour le tracé des bassins versants. Pour que le tracé des bassins versants puisse être réalisé, le positionnement des stations a dû être corrigé quand cela était nécessaire, pour les replacer au fond des talwegs. Ce travail peut donc représenter une démarche assez lourde dans le processus de délimitation car il faut vérifier le positionnement de chaque station par rapport au réseau de drainage réel et au réseau théorique. D'autre part, une autre difficulté associée à cette démarche est liée au fait que les outils SIG utilisés ne permettent pas de tracer des bassins versants se chevauchant : les bassins versants emboîtés ne peuvent pas être tracés directement. Ces deux difficultés apportent donc des contraintes importantes dans la démarche d'automatisation du traçage des bassins versants.

Le logiciel SIG ArcGIS et son extension Spatial Analyst fournissent les outils de base nécessaires à la génération des limites de bassins versants à partir d'un MNT. Toutefois, ces outils sont individualisés suivant leur fonction première ; une partie du travail a donc consisté à créer une boîte à outils spécifique à cette tâche de traçage des contours d'une surface drainée. Cette boîte à outils personnalisée permet ainsi d'enchaîner selon un ordre précis les différents géotraitement nécessaires à la délimitation du contour des bassins versants. Cette méthode ne peut être automatisée de A à Z. Elle est donc semi-automatique car ponctuée par des étapes indispensables de contrôle par l'opérateur des contours dessinés automatiquement. L'opérateur est par conséquent amené si besoin à intervenir dans le processus de réalisation. La description détaillée de la méthode est consultable en annexe de ce rapport.

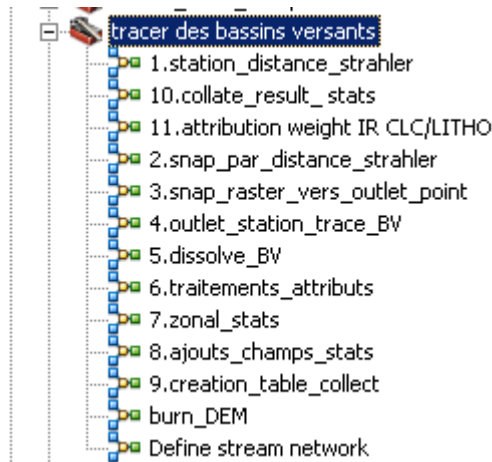
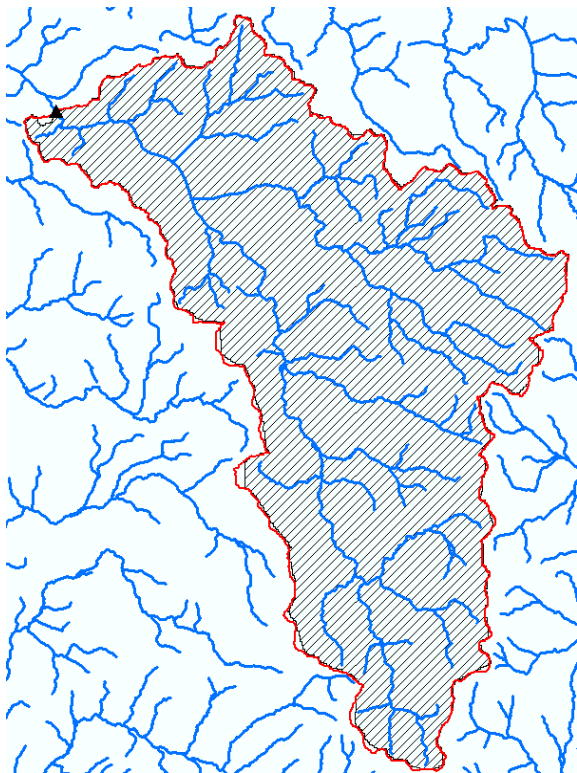


Figure 5: Boîte à Outils personnalisée (ArcGIS) pour la semi-automatisation de la délimitation des bassins versants et le calcul des statistiques zonales

Le développement de cette boîte à outils est apparu être au départ une tâche relativement chronophage. Toutefois, cette boîte à outils s'est ensuite révélée être performante lors de la délimitation de nouveaux bassins versants car en effet l'opérateur doit dérouler la méthodologie en activant les différents outils ordonnancés auparavant.

Afin de comparer l'influence de la résolution du MNT sur le tracé des contours des bassins versants, nous avons superposé les contours d'une cinquantaine de bassins versants tracés à partir des deux MNTs. En moyenne on constate une bonne correspondance entre les bassins versants avec des écarts non significatifs (cf. Figure 6).



Surface du bassin versant :

Tracé à partir du MNT 50 m : **226 km²**
Contours en noir et intérieur hachuré noir

Tracé à partir du MNT 25 m : **228 km²**
Contours en rouge

Figure 6 : Comparaison des tracés d'un BV calculés à partir des deux MNTs

Pour finir, une jointure est réalisée sur la base de l'attribut « code station », entre le fichier de points des stations et le fichier de polygones des bassins versants afin de documenter ces derniers avec les caractéristiques des stations (Nom du cours d'eau, Date de mise en service, Code et nom du département).

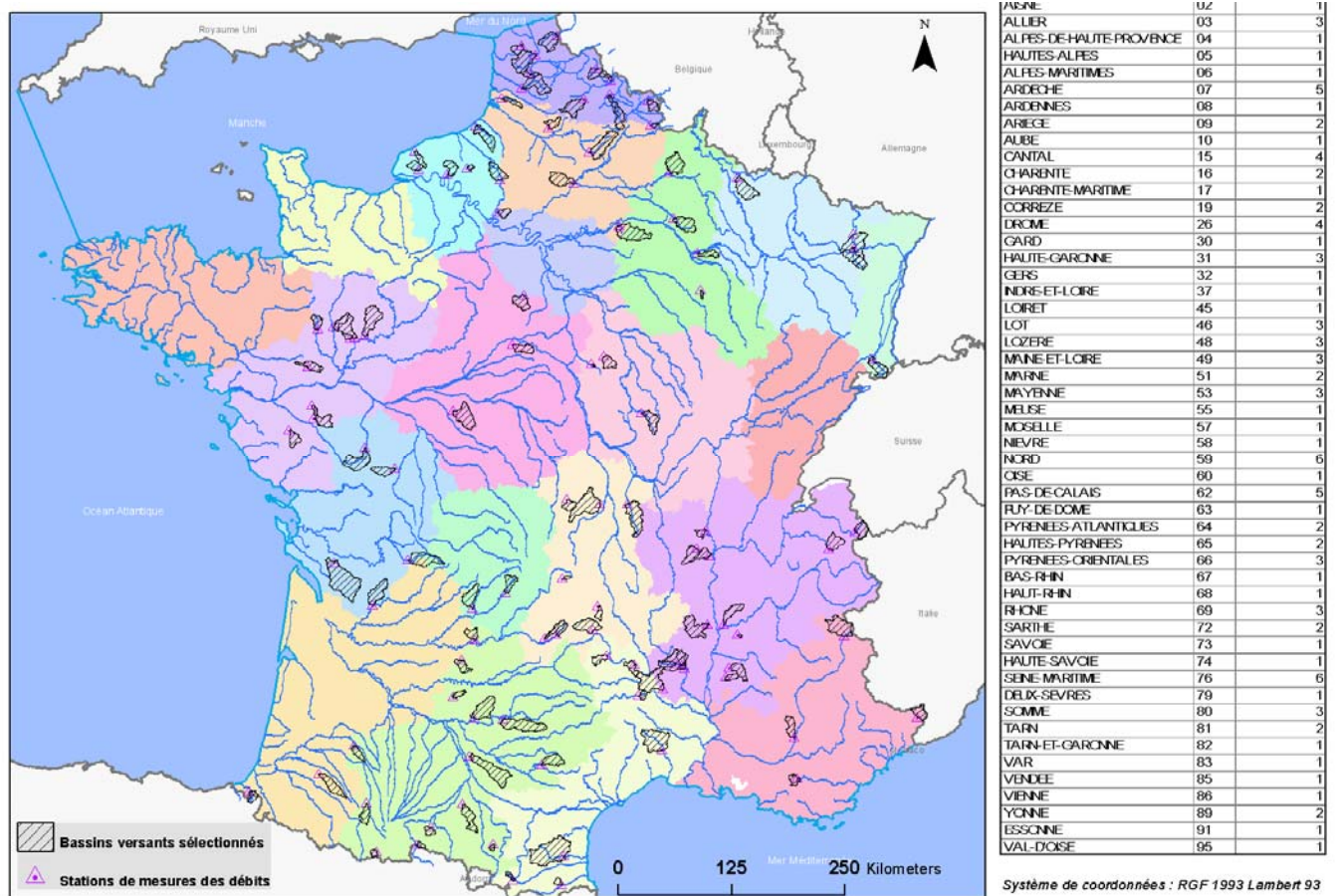


Figure 7 : Carte des 102 bassins versants à l'échelle nationale

2.2.5. Calcul des statistiques zonales

L'outil d'analyse spatiale « statistiques zonales » d'ArcGIS permet de prendre en compte plusieurs variables additionnelles pour décrire l'hétérogénéité spatiale des bassins. Ainsi, les approches plus récentes incorporent des variables dépendantes de la topographie, de l'occupation du sol, la nature du sol et du sous-sol.

L'outil permet de calculer les statistiques des valeurs d'un raster (ici les bases de données agro - topo – géologiques) dans chaque zone d'un autre jeu de données (ici, les polygones de bassins versants). Toutefois, comme pour le traçage des contours, une difficulté supplémentaire s'ajoute dans le processus provenant du fait que les zones en entrée comportent des polygones superposés, et que l'outil de base ne permet pas d'effectuer une analyse zonale pour chaque polygone individuel. En effet, comme l'entité en entrée est convertie en raster, chaque emplacement ne peut avoir qu'une seule valeur. Une méthode consiste à traiter les statistiques zonales de façon itérative pour chacune des zones de polygones et d'assembler au final les résultats.

La boîte à outils personnalisée présentée ci-dessus (cf. Figure 5) a donc été complétée par trois nouveaux outils de modèles (étapes 7, 8, 9, 10) permettant (1) de calculer de façon itérative pour chacun des BVs les statistiques suivantes :

- Calcul d'une pente moyenne à 25 m
- Calcul d'une altitude moyenne à 25m
- Calcul d'un IDPR moyen à 25 m
- Calcul d'un IDPR moyen à 50 m
- Calcul d'une occupation du sol dominante
- Calcul d'une formation lithologique dominante

puis (2) de rassembler les résultats dans des tables qui sont ensuite associées par jointure au fichier final des bassins versants.

L'intérêt des statistiques zonales est alors de :

- Mettre en corrélation les différents facteurs agro-topo-géol avec les résultats du coefficient de ruissellement (cf. partie 3 : Résultats)
- Caractériser l'échantillon des bassins versants : calcul des statistiques descriptives pour les données quantitatives et pour les données qualitatives comptage des modalités de Litho ou occupation du sol, régression linéaire entre les facteurs et identification des points aberrants ...)

Value raster	Libellé	Effectif par modalité
2	Tissu urbain discontinu	1
15	Vignobles	1
29	Forêt et végétation arbustive en mutation	1
31	Roches nues	1
34	Glaciers et neiges éternelles	1
20	Systèmes cultureux et parcellaires complexes	2
25	Forêts mélangées	2
26	Pelouses et pâturages naturels	2
27	Landes et broussailles	2
24	Forêts de conifères	4
18	Prairies	15
23	Forêts de feuillus	26
12	Terres arables hors périmètres d'irrigation	44
Total Bassins versants :		102

Tableau 4 : Comptage des BVs par modalité d'OCS

Value raster	Libellé	Effectif par modalité
9	Ophiolites	0
11	Micaschistes	0
6	Sables	1
7	Basaltes et rhyolites	6
5	Grès	7
10	Gneiss	9
12	Schistes et grès	9
8	Granites	10
1	Argiles	16
3	Craie	19
2	Calcaires, marnes et gypse	25

Total Bassins versants : 102

Tableau 5: Comptage des BVs par modalité de Litho

2.2.6. Calcul des pluies pondérées et mise en corrélation avec les données de débits journaliers

A partir de ces données et du tracé des bassins versants, une analyse sous SIG ainsi qu'un algorithme ont été développés pour calculer les pluies cumulées journalières pour chacun des 102 bassins versants. Le volume journalier de pluie efficace est ensuite relié au débit journalier observé à l'exutoire, formant une base de données pluie-débit qui couvre une période d'environ 10 ans.

Tout d'abord, la mise en forme des données météorologiques a été particulièrement chronophage et a demandé des développements informatiques.

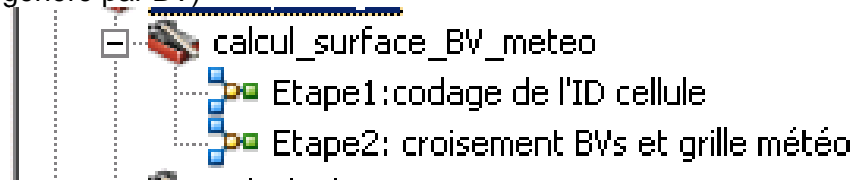
La récupération des données SAFRAN sous forme de fichiers ASCII GRID (format facile à importer sous ArcView par contre difficilement exploitable avec MATLAB) nécessite une mise en forme de ces dernières (langage FORTRAN) afin qu'elles puissent être lisibles dans un fichier .txt respectant le format suivant :

Date (aaaammjj)	Pluie mm/24h
-----------------	--------------

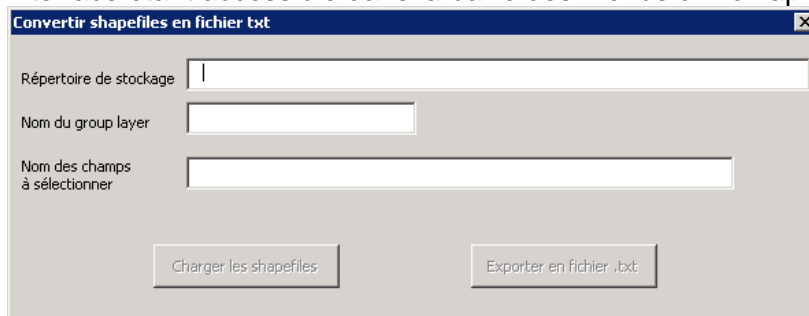
Il faut ensuite réaliser une superposition sous SIG des bassins versants avec les caractéristiques intrinsèques de la grille météo (cf. illustration en annexe 3 de ce rapport). Pour cela, une routine a été développée sous ArcGIS afin d'automatiser la procédure :

- Création d'une grille météo avec identifiant unique pour chacune des cellules de la grille raster

- transformation en vecteur la grille météo et récupération des identifiants de cellule dans la table attributaire du nouveau shapefile
- Activation à l'aide d'un outil de géotraitement du croisement des surfaces des BVs avec la grille météo :
 - Etape 1 codage de l'ID de cellule sur 4 chiffres
 - Etape 2 : Récupération pour chacun des BVs de leur surface (en m2 sans décimales) décomposée en fonction des pixels de la grille météo (un shapefile généré par BV)



- Exportation des informations de surfaces contenues dans la table attributaire sous forme d'un fichier .txt nommé par le nom de la station à l'aide d'une interface personnalisée développée en langage VBA ArcObjects. Cette interface étant accessible dans la barre des menus d'Arcmap.



La seconde étape consiste ensuite à lire sous MATLAB les fichiers résultats « .txt » des valeurs de surface pour les croiser avec les données de pluie journalières de chacune des cellules de la grille (jointure entre les fichiers .txt par ID de cellule) et effectuer un calcul des pluies cumulées pour chacune des surfaces de bassins versants.

La structure du fichier de sortie est la suivante :

aaaammjj	Debits journaliers (L/s)	Date numérique	année	Saison (hiver, été, printemps)	Dynamique des débits (crue /décru)	Pluie cumulée (L/jour)	Pluie cumulée en (mm/jour)
----------	--------------------------	----------------	-------	--------------------------------	------------------------------------	------------------------	----------------------------

avec au total un fichier par BV sur la période étudiée.

2.2.7. Calcul des débits et des coefficients de ruissellement

A partir de ces jeux de données, un travail de mise en forme et de traitement statistique a été réalisé sous Matlab. La méthode statistique des k-means est appliquée à chaque chronique de débit pour différencier les débits de base des hauts

débits. Dans les hauts débits, les montées de crues sont séparées des descentes de crue pour des applications ultérieures (Delmas, 2011).

Pour calculer un indice de ruissellement, nous nous sommes intéressés aux périodes de montées des eaux en régimes de hautes eaux comme le montre la Figure 8, en considérant que ce volume d'eau représente la réponse du ruissellement de surface à la pluie. Par contre pour le volume de pluie, la routine a été adaptée afin de donner la possibilité de prendre en compte soit, la totalité de la pluie de l'évènement correspondant, ou seulement le volume de pluie tombé pendant la période de montée.

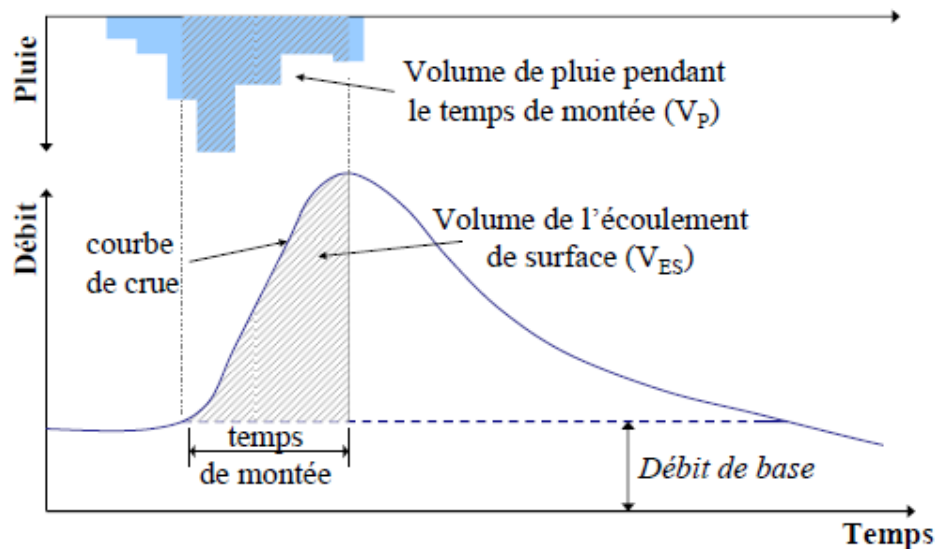


Figure 8 : Hyétochrome et hydrochrome d'un évènement pluie-débit : prise en compte de l'écoulement de surface (Delmas, 2011)

Pour chaque évènement de montée des eaux, un « coefficient de ruissellement de crue » est calculé à partir du volume d'eau écoulé durant le temps de montée et du volume de pluie efficace (pluie - évapotranspiration). Pour chaque évènement i , l'indice

de ruissellement IR_i est calculé comme $IR_i = V_{ESi} / V_{Pi}$ avec :

- V_{ESi} le volume de l'écoulement de surface à l'exutoire du bassin versant durant le temps de montée et
- V_{Pi} le volume de pluie précipité pendant l'évènement pluvieux correspondant.

Puis pour chaque bassin versant 'l'indice de ruissellement' moyen (IR) est calculé sur toute la période considérée :

$$IR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n IR_i$$

où n est le nombre d'évènement de crues durant la période de mesure.

Cela permet de caractériser le bassin versant par la proportion de l'eau de pluie qui rejoint directement la rivière par écoulement de surface.

Donc plus cet indice est élevé, plus le bassin versant a un potentiel ruisselant (et donc moins infiltrant). La pente moyenne et l'IDPR moyen sont calculés pour chacun des bassins versants, pour analyser comment l'indice de ruissellement leur est lié.

3. Résultats

Une analyse de la réponse de l'écoulement de surface à la pluie a donc été effectuée pour évaluer la propension de l'IDPR à caractériser la connectivité hydrologique des versants. Des bassins versants de petite taille ont été choisis pour que leurs surfaces soient suffisamment homogènes en termes d'IDPR, en espérant mettre en évidence une relation entre un indice de ruissellement (IR) et l'IDPR moyen du bassin versant. D'autre part, les bassins versants de petite taille assurent de faibles temps de réponse entre le ruissellement à l'exutoire et la pluie. L'ensemble de cette procédure nécessite des données journalières de pluie et de débit à l'exutoire. Au moins une dizaine d'années de données est nécessaire pour qu'elles soient représentatives du fonctionnement moyen des bassins versants.

Les coefficients de ruissellements calculés s'étalent de moins de 1% à plus de 55% avec une majorité comprise entre 11 et 17% (Figure 9). La base de données représente donc bien une certaine variabilité de comportement allant de bassins très infiltrants à des bassins qui transmettent plus de la moitié des précipitations reçues. Cette information peut déjà servir d'indication sur la propension des bassins à générer des crues rapides.

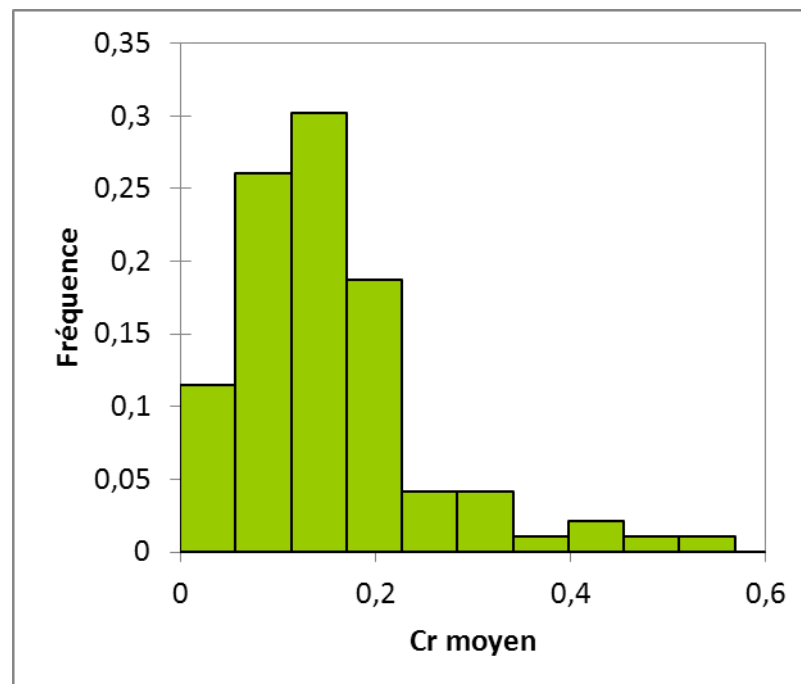


Figure 9 : histogramme de fréquence des coefficients de ruissellement calculés

La simple information d'un coefficient moyen n'est cependant pas suffisante car elle peut lisser une variabilité existante soit en fonction de la saison soit en fonction de l'intensité des pluies (Figure 10). Par conséquent, si une utilisation du coefficient de

ruissellement comme indicateur est envisageable, elle demande donc une analyse plus poussée en fonction du régime météorologique et du contexte lithologique et géomorphologique des différents bassins.

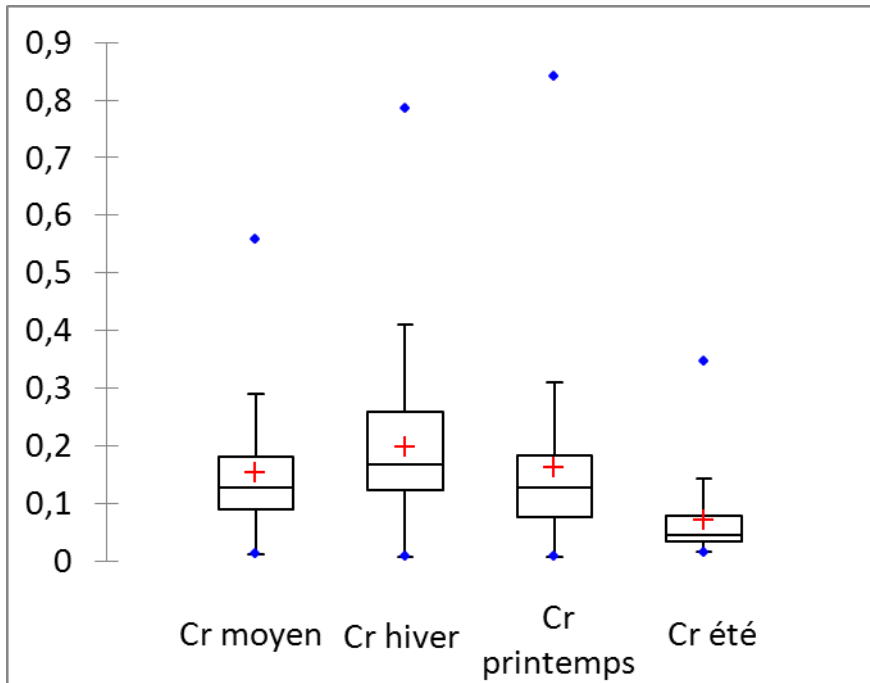


Figure 10 : Variabilité des coefficients moyens de ruissellements en fonction des saisons.

Au-delà de cette analyse sur l'utilisation potentielle de l'information première fournie par les coefficients, l'objectif recherché plus particulièrement est la possibilité d'approcher les variabilités existantes de ces coefficients de ruissellement (CR) au travers de l'IDPR actualisé avec le MNT à 50m de résolution et la dernière version de la BD CARTHAGE. En effet, au contraire du CR qui nécessite la présence d'une station de mesure du débit pour être calculé, l'IDPR est calculable pour tous les bassins versants.

Les différents paramètres qui ont été extraits pour tous les bassins sont :

1. l'occupation du sol majoritaire,
2. la lithologie majoritaire,
3. la pente moyenne et
4. l'altitude moyenne.

Malgré un large choix de bassin représentatifs du territoire et de situations contrastées, il est apparu que certaines combinaisons de classes de paramètres étaient fortement corrélées, empêchant ainsi leur utilisation pour discriminer l'influence de l'IDPR en

fonction des caractéristiques des bassins. Il est ainsi très difficile de prendre l'occupation du sol en compte, la présence de forêt étant fortement corrélée avec les pentes ou bien alors les terres arables avec l'altitude. L'influence de la morphologie reste dominante sur l'usage des terres, notamment pendant les crues de printemps (Figure 11)

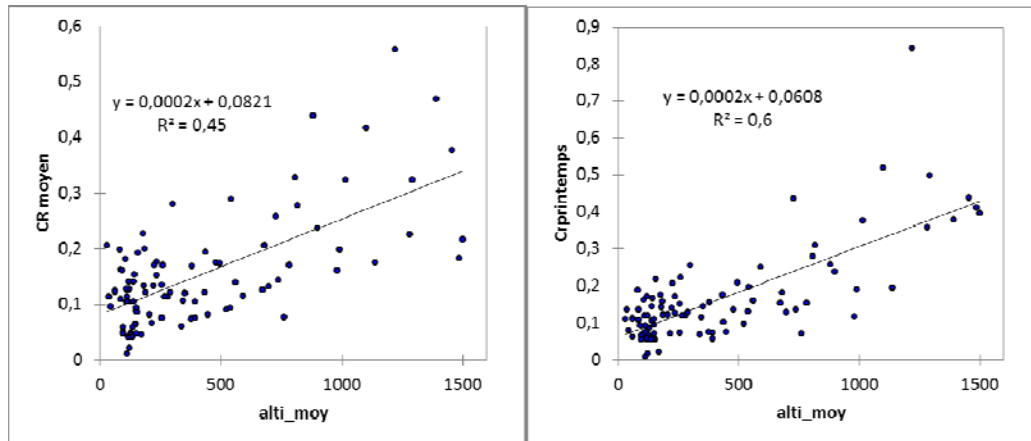
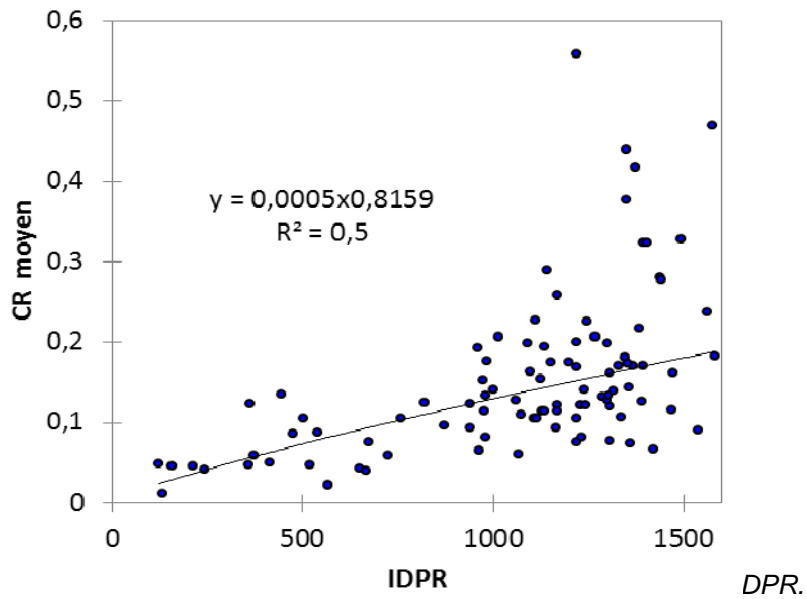


Figure 11 : Relation entre le coefficient de ruissellement moyen et de printemps et l'altitude moyenne des bassins versants.

La

Figure 12 présente la relation entre les coefficients de ruissellement moyens et l'IDPR. Si une tendance générale se dégage, elle reste bruitée, notamment pour les valeurs d'IDPR élevée. L'IDPR seul ne semble donc pas constituer un indicateur précis. **Toutefois, l'IDPR fait apparaître un comportement à seuil, en effet, en deçà d'un IDPR à 900, on ne trouve pas de bassins ruisselants. Ce seuil pourrait constituer une première classification des bassins et permettre de se focaliser sur les bassins les plus ruisselants.**



Figur

IDPR

DPR.

La relation entre les coefficients de ruissellement et l'IDPR s'affine pour les pentes faibles (inférieures ou égales à 5% ; Figure 13) ou pour les altitudes les moins élevées (inférieures ou égales à 200 m ; Figure 14). Cette observation est intéressante car c'est pour les pentes faibles que les processus de connectivité sont les plus difficiles à définir, les indices morphologiques n'étant plus discriminants. Cependant, comme pour les résultats précédents, la relation ne semble pas assez robuste pour l'établissement d'un indicateur prédictif déterministe, mais plutôt en première approche, pour discriminer la famille de bassins potentiellement les plus à risque.

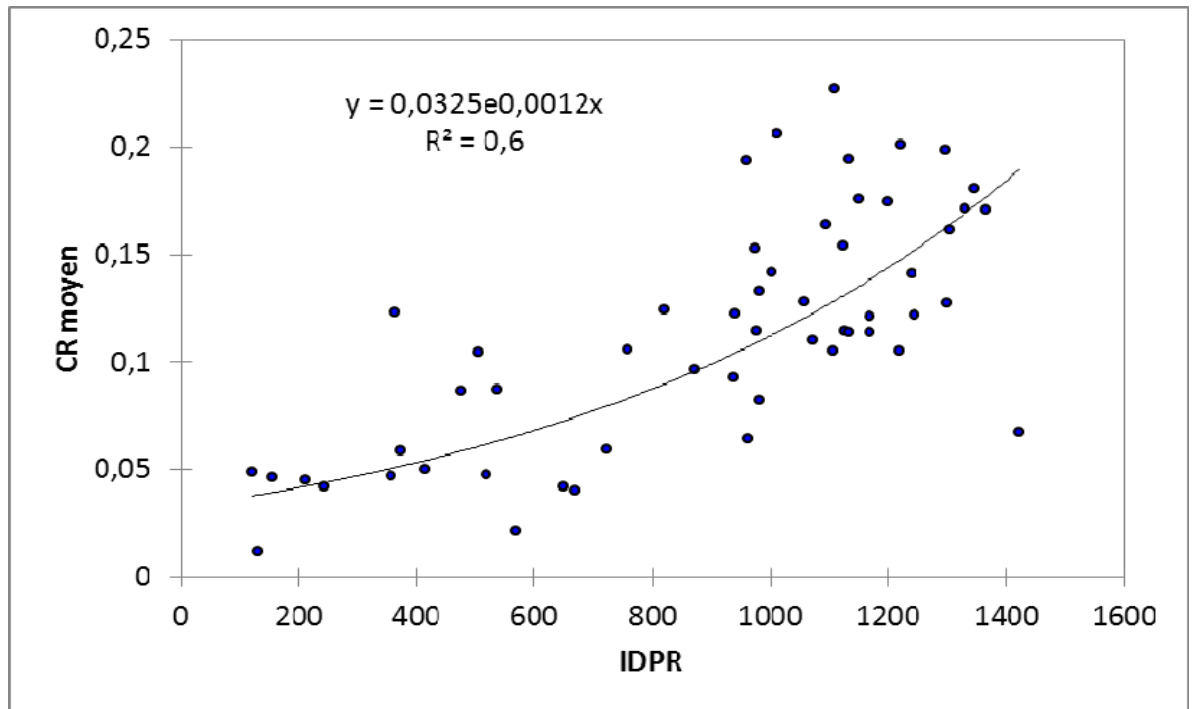


Figure 13 : Relation entre le coefficient de ruissellement moyen et l'IDPR pour les pentes inférieures ou égales à 5%.

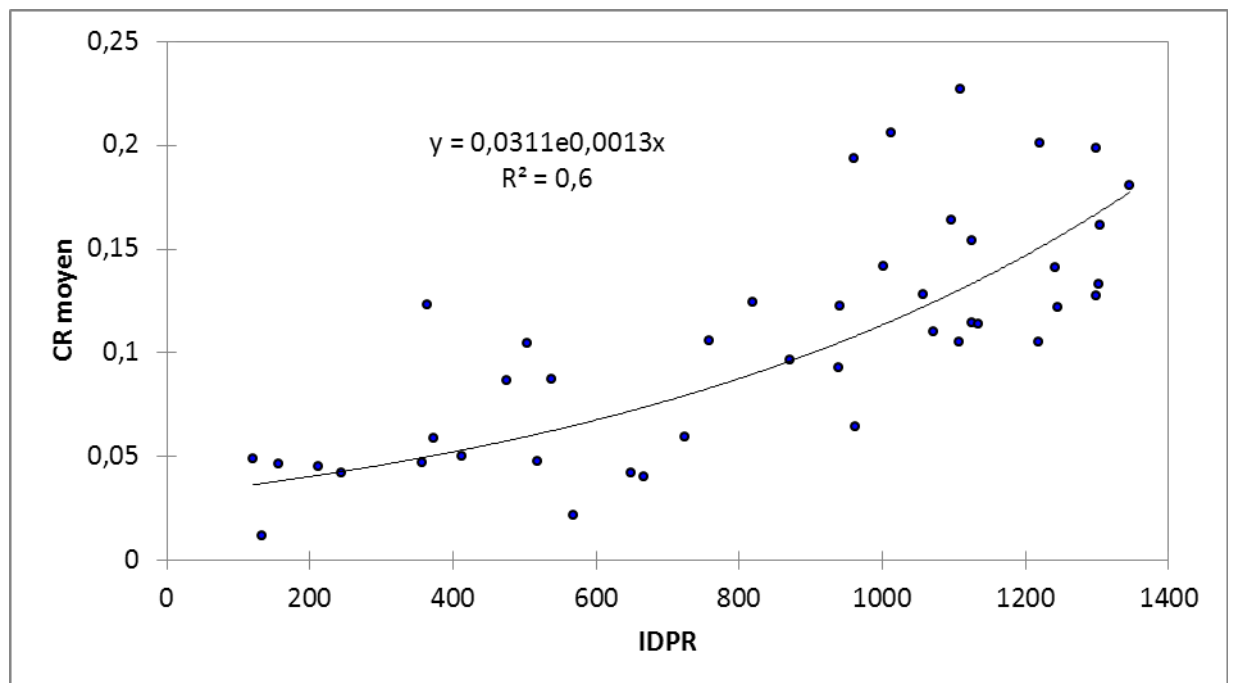


Figure 14 : Relation entre le coefficient de ruissellement moyen et l'IDPR pour les altitudes moyennes inférieures à 200m.

4. Conclusions

L'objectif de cette étude était de tester la pertinence de l'Indice de Persistance des Réseaux (IDPR) comme indicateur du coefficient de ruissellement des bassins versants.

Pour cela une sélection d'une centaine de bassins versants représentatifs de la diversité du territoire a été réalisée. Pour chacun de ces bassins, une fois les contours hydrologiques déterminés, les statistiques zonales des principaux paramètres physiographiques et d'occupations du sol ont été calculées. L'IDPR a également été actualisé avec le MNT à 25m de résolution et la dernière version de la BD CARTHAGE.

Des routines ont ensuite été développées ou adaptées pour établir des chroniques de débits (par montée / descentes de crue, année et saison) et pour délimiter des événements pluvieux sur la base des données météorologiques SAFRAN et ainsi calculer des volumes de pluies par événement pour chaque bassin. La mise en correspondance des deux bases ainsi constituées a donc permis de calculer des coefficients de ruissellement.

Des corrélations se dessinent entre l'IDPR et les coefficients de ruissellement, notamment pour les pentes faibles. Ces corrélations n'apparaissent cependant pas assez robustes pour une utilisation en prédiction déterministe quantitative.

Deux perspectives se dégagent donc de cette étude. Tout d'abord la base établie peut servir, ou être incorporée dans un catalogue, notamment les coefficients de ruissellement qui donnent une bonne indication du comportement des bassins. Les routines programmées pourraient permettre d'élargir cette base à tous les bassins versants jaugés et les mettre en perspective par rapport à des événements d'une période de retour donnée. Pour les bassins non jaugés, l'utilisation de l'IDPR peut guider pour faire une sélection de bassins à surveiller en première approche, les bassins avec un IDPR supérieur à 900 étant les plus susceptibles à répondre fortement.

5. Références bibliographiques

- [1] Delmas, M., 2011. Origine des exports de sédiments fluviaux : prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des versants. Unpublished PhD thesis, University of Pierre et Marie Curie, Paris.
- [2] Demargne, C. 2001. La qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation des crues. Thèse. Université de Marne-la-vallée. 275p.
- [3] Desprats J-F, Fleury P., Marechal J.C., Thiéry D., Pinson S., Mardhel V., Stollsteiner Ph., Cerdan O., Ollivier P., 2010. Appui aux actions SCHAPI: Modélisation de bassins versants, indice de saturation du karst et caractérisation du ruissellement. Rapport annuel 2011 – BRGM RP59216-FR, 184 p, 66 ill., 10 annexes
- [4] Fairfield, J, Leymarie, P, 1991, Drainage networks from grid Digital Elevation Models. Water resources Research. pp 709-717.
- [5] Jenson, S.K, Domingue, J.O, 1998, Extracting topographic structures from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric engineering and remote sensing, pp 1593-1600.
- [6] Le Moigne, P., 2002. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Technical report, Centre national de recherches météorologiques, Météo-France.
- [7] Mardhel V., Frantar P., Uhan J., Mio A., 2004. Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia. .Int. Conf. groundwater vulnerability assessment and mapping. Ustron, Poland, 15-18 June 2004., Poland.

Annexe 1

Liste des stations hydriques sélectionnées

Code station	Nom/lieu-dit station	Département	Surface drainée BV	Altitude moyenne BV
A1050310	L'III à Altkirch	HAUT-RHIN	241	434
A9021010	La Sarre à Sarrebourg	MOSELLE	311	380
A9091060	La Sarre à Diedendorf	BAS-RHIN	715	330
B4572010	Le Loison à Han-lès-Juvigny	MEUSE	348	236
D0137050	L'Helpe Mineure à Fourmies	NORD	27	224
D0206010	La Solre à Ferrière-la-Grande	NORD	115	190
E1566010	La Sensée à Étaing	PAS-DE-CALAIS	296	97
E1726020	La Selle à Denain	NORD	258	116
E2377210	L'Elnon à Lecelles	NORD	68	37
E3346010	La Marque à Bouvines	NORD	134	43
E3511210	La Lys à Ligny	PAS-DE-CALAIS	87	147
E4035710	L'Aa à Wizernes	PAS-DE-CALAIS	391	137
E4306010	La Hem à Tournehem-sur-la-Hem [Guémy]	PAS-DE-CALAIS	106	121
E4905710	L'Yser à Bambecque [Engelshof]	NORD	273	30
E5406510	La Ternoise à Hesdin	PAS-DE-CALAIS	344	120
E6351420	La Somme à Ham [Estouilly]	SOMME	384	97
E6397010	L'Hallue à Bavelincourt	SOMME	117	113
E6498315	La Maye à Arry	SOMME	96	62
G1003010	L'Yères à Touffreville-sur-Eu	SEINE-MARITIME	267	151
G7103010	La Ganzeville à Ganzeville	SEINE-MARITIME	90	125
H1333010	La Laine à Soullaines-Dhuys	AUBE	22	202
H2021010	L'Yonne à Montigny-en-Morvan [Chassy]	NIEVRE	227	542
H3102010	L'Ouanne à Toucy	YONNE	153	267
H3113310	Le Ru du Four à Saint-Fargeau [Ronchères]	YONNE	6	261
H4033010	La Juine à Méréville	ESSONNE	203	131
H5173110	Le Bruxenelle à Brusson	MARNE	117	157
H5302010	Le Surlélin à Saint-Eugène	AISNE	455	206
H6233020	La Vaux à Écly	ARDENNES	321	142
H6402010	La Vesle à Bouy	MARNE	285	154
H7423710	L'Aronde à Clairoux	OISE	280	94
H8012010	L'Epte à Gournay-en-Bray	SEINE-MARITIME	245	149
H8043310	L'Aubette de Magny à Ambleville	VAL-D'OISE	99	124

H9913030	Le Cailly à Cailly [Cailly]	SEINE-MARITIME	29	170
H9923020	L'Austreberthe à Saint-Paër	SEINE-MARITIME	157	138
H9943420	Le Commerce à Gruchet-le-Valasse	SEINE-MARITIME	117	114
K1533020	La Besbre à Lapalisse [Moulin Marin]	ALLIER	454	561
K2123010	Le Chapeauroux à Châteauneuf-de-Randon [Hermet]	LOZERE	123	1282
K2544010	L'Allagnonette à Massiac	CANTAL	68	882
K3373010	La Bouble à Chareil-Cintrat	ALLIER	560	438
K4383110	Le Dhuy à Saint-Cyr-en-Val [Gobson]	LOIRET	166	114
K5343210	L'Oeil à Malicorne [Beaufrancon]	ALLIER	124	477
K7433030	L'Indrois à Genillé	INDRE-ET-LOIRE	396	140
L2404030	La Boivre à Vouneuil-sous-Biard [La Ribalière]	VIENNE	176	150
L8122140	Le Thouet à Saint-Loup-Lamairé [Pont de Saint-Loup]	DEUX-SEVRES	383	178
M0583020	La Vègre à Asnières-sur-Vègre	SARTHE	400	122
M0653110	La Vaige à Bouessay	SARTHE	236	85
M0674010	La Taude à Saint-Brice	MAYENNE	46	84
M3514010	L'Ouette à Entrammes	MAYENNE	119	91
M3711810	L'Oudon à Cossé-le-Vivien	MAYENNE	133	110
M6014010	Le Beuvron à Andrezé [Tuvache]	MAINE-ET-LOIRE	38	107
M6323010	L'Erdre à Candé [La Grée]	MAINE-ET-LOIRE	172	62
M7203020	La Moine à Cholet [Pont RN 249]	MAINE-ET-LOIRE	176	140
M7433110	La Petite Maine à Saint-Georges-de-Montaignu [Fromage]	VENDEE	150	83
O0015310	Le Maudan à Fos	HAUTE-GARONNE	45	1391
O0105110	La Neste de Cap de Long à Aragnouet [Les Edelweiss]	HAUTES-PYRENEES	55	2122
O0554010	L'Arbas à Castelbiague [Pont de Prades]	HAUTE-GARONNE	88	680
O1484320	La Touyre à Montferrier [2]	ARIEGE	29	1454
O1844020	La Lèze à Lézat-sur-Lèze	ARIEGE	244	352
O2344010	Le Girou à Cépet	HAUTE-GARONNE	522	215
O3011010	Le Tarn au Pont-de-Montvert [Fontchalettes]	LOZERE	63	1290
O4194310	Le Gijou à Vabre [Rocalé]	TARN	207	698
O5664010	Le Cérou à Milhars	TARN	491	344
O5854010	La Lère à Réalville	TARN-ET-GARONNE	385	221

O6125010	La Petite Barguelonne à Montcuq	LOT	64	237
O7234010	La Rimeize à Rimeize	LOZERE	118	1136
O7354010	La Lander à Saint-Georges	CANTAL	308	990
P0115010	La Burande [ou ru de Burons] à la Tour-d'Auvergne	PUY-DE-DOME	21	1221
P1712910	La Cère à Vic-sur-Cère [Comblat-le-Pont]	CANTAL	89	1099
P1744010	La Jordanne à Aurillac [Passerelle Paul Riotte (LADOUX)]	CANTAL	103	1014
P2315020	La Borrèze à Lachapelle-Auzac [Lamothe]	LOT	122	255
P2454310	L'Ourajoux à Salviac [Lafuste]	LOT	129	257
P3274010	La Loyre à Saint-Viance [Pont de Burg]	CORREZE	253	289
P3352510	La Corrèze à Corrèze [Pont de Neupont]	CORREZE	163	726
P8394310	La Tude à Médillac [Pont de Corps]	CHARENTE	315	108
Q0224020	L'Échez à Bordères-sur-l'Échez	HAUTES-PYRENEES	148	448
Q2094310	L'Isaute à Monlezun-d'Armagnac	GERS	111	121
Q3354010	Le Luy de Béarn à Saint-Médard	PYRENEES-ATLANTIQUES	260	185
R1192510	La Tardoire à Montbron [Moulin de Lavaud]	CHARENTE	390	282
R5123320	La Seugne à Saint-Seurin-de-Palenne [La Lijardière]	CHARENTE-MARITIME	925	63
S5144010	La Nivelle à Saint-Pée-sur-Nivelle	PYRENEES-ATLANTIQUES	89	302
U4525210	Le Morgon à Villefranche-sur-Saône	RHONE	67	337
U4635010	La Brévenne à Sain-Bel	RHONE	217	539
V0002010	L'Arve à Chamonix-Mont-Blanc [Pont des Favrand]	HAUTE-SAVOIE	192	2471
V3015020	L'Yzeron à Francheville [Taffignon]	RHONE	128	392
V3724010	Le Doux à Colombier-le-Vieux	ARDECHE	379	739
V4015030	La Barberolle à Barbières [Pont des Ducs]	DROME	9	782
V4414010	Le Roubion à Soyans	DROME	185	672
V4455010	Le Jabron à Souspierre	DROME	80	522
V5004030	L'Ardèche à Meyras [Pont Barutel]	ARDECHE	99	899
V5014030	L'Ardèche à Ucel	ARDECHE	477	805
V5015210	La Volane à Vals-les-Bains	ARDECHE	109	817
V5045030	Le Chassezac à Gravières	ARDECHE	496	982
W0414010	L'Arly à Ugine	SAVOIE	223	1487
W3534020	L'Herbasse à Clérieux [Pont de l'Herbasse]	DROME	191	375
X0100010	La Durance à Briançon [aval]	HAUTES-ALPES	425	2167
X1335010	Le Lauzon à Villeneuve	ALPES-DE-HAUTE-	172	761

		PROVENCE		
Y0255020	L'Ample à Reynès [Le Vila]	PYRENEES-ORIENTALES	49	590
Y0404010	La Têt à Mont-Louis	PYRENEES-ORIENTALES	41	2174
Y0664040	L'Agly à Estagel [Mas de Jau]	PYRENEES-ORIENTALES	909	495
Y3444010	Le Vidourle à Salinelles [Moulin de Runel]	GARD	553	182
Y5002020	L'Argens [source] à Seillons-Source-d'Argens	VAR	101	392
Y6614010	La Roya à Tende [St-Dalmas-de-Tende]	ALPES-MARITIMES	168	1501

Annexe 2

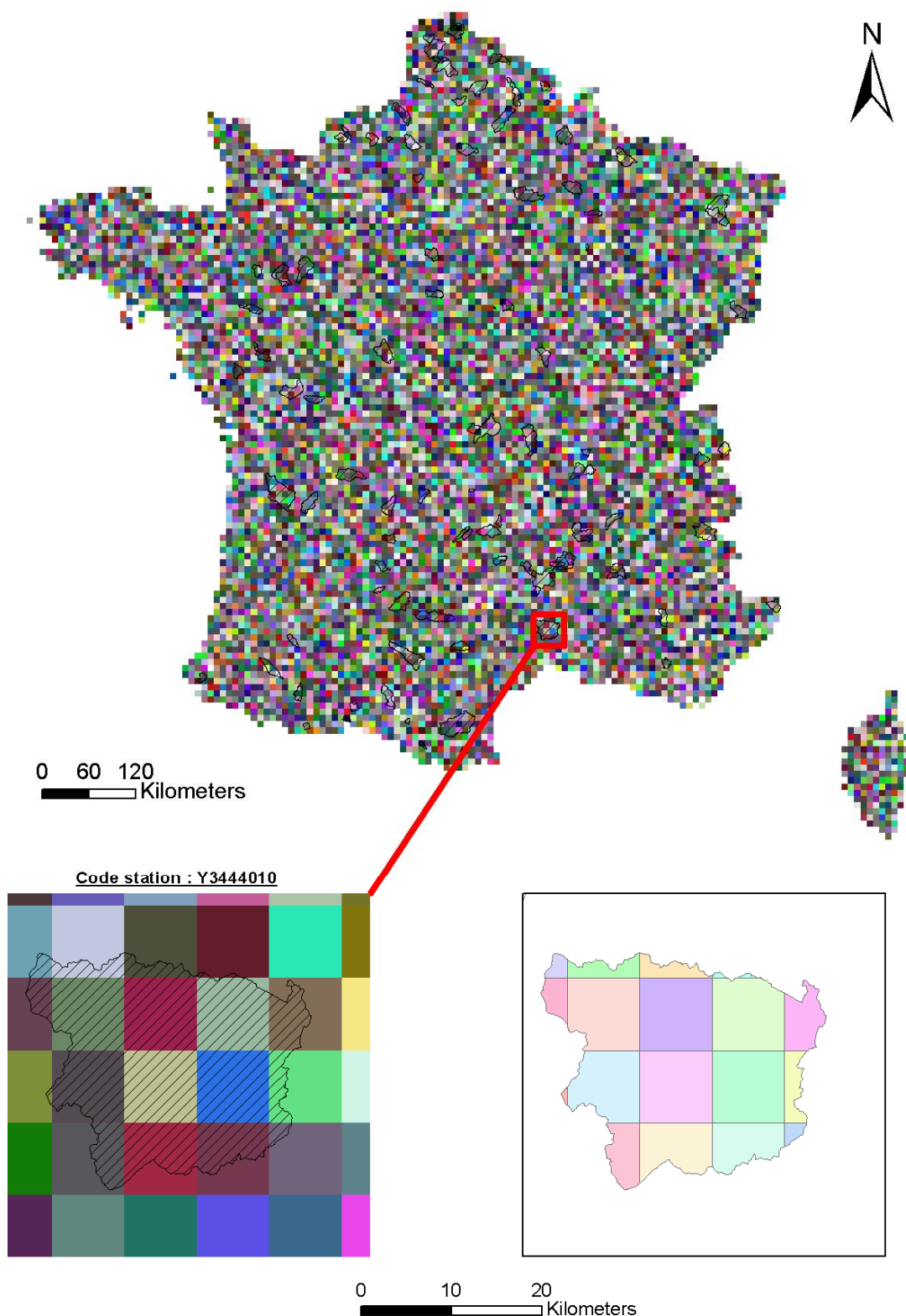
Boîte à outils (ArcGIS, Model Builder) pour la semi-automatisation de la délimitation des bassins versants et le calcul des statistiques zonales

Les géotraitements à enchaîner sont les suivants :

1. Calcul de distance pour chacune des stations par rapport au réseau théorique
2. Calcul d'un raster de flux accumulé sur chacune des cellules en fonction de la direction d'écoulement
3. Placement des stations de mesures sur le réseau théorique par capture des points d'écoulement dans la cellule d'accumulation de flux la plus élevée, selon une distance donnée (calculée en amont pour chacune des stations)
4. Création d'un shapefile (vecteur points) des exutoires et extraction pour chacun de ces points d'une valeur d'ordre d'écoulement déterminée par la méthode Strahler
5. Etape de vérification manuelle de la localisation des points puis si besoin, en fonction des caractéristiques connues des stations de mesures : Repositionnement manuel de certains des points à leur exutoire puis nouvelle extraction des valeurs d'ordre d'écoulement
6. Délimitation des bassins versants par classes d'ordre d'écoulement (pour essayer d'éviter au maximum le problème des bassins emboîtés) : les données demandées en entrée du modèle : raster de direction de flux, l'emplacement des points exutoires, le nom du champ utilisé pour attribuer des valeurs aux emplacements de points exutoire
7. Etape de contrôle du tracé des bassins versants et répétition de l'opération si nécessaire (pour certains BVs mal tracés, il peut être nécessaire de faire une opération de « stream burning » qui abaisse les valeurs d'élévation d'un MNT selon le tracé d'un cours d'eau naturel connu)
8. Regroupement des résultats dans un seul et unique shapefile, agencement de sa table attributaire pour rassemblement de l'ensemble des informations concernant ces BV
9. Par itération sur chacune des entités du shapefile (chacun des bassins versants), calcul des statistiques zonales (pente et altitude moyenne, IDPRs moyens, litho et OCS majoritaires) puis stockage des résultats dans une table et enfin attribution des valeurs à chacune des entités par jointure sur le champ unique « code station ».

Annexe 3

Illustration du découpage sous SIG des BVs selon la grille météo SAFRAN





**Centre scientifique et technique
Service RIS/RMT**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34