

# Etude de la sensibilité de la densité de drainage aux hypothèses de calcul.

Stage de L3 à l'Université Pierre et Marie Curie

Cécile Coulon

14 août 2015

## Résumé

La modélisation de réseaux hydrographiques s'effectue à partir de Modèles Numériques de Terrain (MNT). La densité de drainage d'un réseau hydrographique est sensible à la résolution du MNT et aux hypothèses de calcul effectuées lors de la modélisation, en particulier le choix d'un seuil hydrographique. Ce seuil, aussi appelé seuil de surface amont drainée, est une valeur à partir de laquelle on considère un pixel du MNT comme un cours d'eau. Un seuil faible ou une résolution élevée font augmenter la densité de drainage. Pour obtenir une densité de drainage qui correspond le mieux au réseau de référence français de l'IGN, choisi comme référence, on trouve que le seuil hydrographique optimal qui minimise les erreurs est proche d' $1 \text{ km}^2$  pour une résolution de  $500\text{m} \times 500\text{m}$  et de  $2 \text{ km}^2$  pour une résolution de  $25\text{m} \times 25\text{m}$ . Dans le modèle global de surface ORCHIDEE, qui utilise comme réseau hydrographique de référence HydroSHEDS à une résolution de  $15 \text{ arcsecondes} \times 15 \text{ arcsecondes}$  ( $15 \text{ arcsecondes}$  correspondent à environ  $500\text{m}$  à l'Equateur) il faudrait donc choisir un seuil de surface amont drainée vers  $1 \text{ km}^2$ . En choisissant un seuil hydrographique optimal, même si la valeur de la densité de drainage correspond le mieux à la réalité, des erreurs sur l'emplacement du réseau persistent, dues à des artefacts du MNT.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>3</b>
2.1	Présentation des données . . . . .	3
2.2	Extraction de bassins versants et de réseaux hydrographiques du MNT . .	4
<b>3</b>	<b>Sensibilité de la densité de drainage au choix du seuil hydrographique</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Détermination d'un seuil optimal, et comparaison de ce seuil pour différentes résolutions</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Emplacement des pixels cours d'eau et erreurs associées.</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Comparaison des seuils hydrographiques optimaux obtenus avec le seuil hydrographique utilisé par HydroSHEDS</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Remerciements</b>	<b>14</b>
<b>9</b>	<b>Références Bibliographiques</b>	<b>14</b>
<b>10</b>	<b>Annexe</b>	<b>15</b>

# 1 Introduction

Sur Terre l'eau douce continentale se trouve sous deux formes : les eaux de surface (fleuves, rivières, lacs etc.) et les eaux souterraines. Face au besoin croissant des hommes en eau douce, pour l'agriculture, l'industrie ou bien l'usage personnel, la pollution des eaux souterraines pose un vrai problème. L'étude des transferts de polluants de la surface vers les nappes phréatiques, et du temps de résidence de ces polluants, est une problématique actuelle en hydrologie. Il est important de connaître le temps de résidence des eaux souterraines (le temps pendant lequel une molécule reste dans un réservoir avant d'en repartir) pour connaître les impacts de cette pollution dans le temps.

De nombreux travaux sont en cours pour améliorer la représentation des eaux souterraines dans les modèles globaux. La thèse en cours de [Schneider, 2015] à l'UMR Metis à l'Université Pierre et Marie Curie s'inscrit dans une logique d'amélioration de la représentation des eaux souterraines du modèle ORCHIDEE, un modèle de surface global. La thèse s'intéresse notamment au temps de résidence des eaux souterraines.

La densité de drainage est un élément de description et d'estimation du temps de résidence des eaux souterraines. Elle intervient dans le calcul de la constante de temps (voir l'équation (3) en annexe). La densité de drainage, définie par [Horton, 1945], est le rapport de la longueur totale du réseau hydrographique sur la surface du bassin versant (un terrain dont l'ensemble des eaux sont drainées par un même point) occupée, soit :

$$Dd = \frac{L}{S} \quad (1)$$

où  $Dd$  est la densité de drainage en  $m/m^2$ ,  $L$  est la longueur totale du réseau hydrographique en  $m$  et  $S$  est la surface du bassin versant en  $m^2$

Cette variable peut être calculée lors de modélisation de réseaux hydrographiques. Cependant, sa valeur dépend des paramètres choisis pendant la modélisation.

Le point de départ de la modélisation des réseaux hydrographiques est l'information topographique. A partir de cette information on obtient la pente, donnée fondamentale pour le reste de la modélisation (voir page 16). Depuis que l'on utilise l'information topographique sous forme de Modèles Numériques de Terrain ou MNT (modèles numériques du relief d'un terrain, sous la forme de grilles de données altimétriques), au lieu de courbes de niveau, la modélisation hydrologique a été transformée. Le traitement des informations est fortement simplifié car numérisé, et la pente des terrains est obtenue avec la dérivée première des MNT, ce qui fait des MNT des outils très intéressants. Cependant l'introduction des MNT a également amené un certain nombre de questions. Une d'entre elles est l'influence de la résolution du MNT sur la densité de drainage finale. Une autre concerne les hypothèses de calcul faites lors de la modélisation. Lors de la modélisation des réseaux hydrographiques, le choix d'un seuil hydrographique est une question critique qui a fait l'objet de nombreuses études depuis les travaux de [Tarboton *et al.*, 1991]. Ce seuil est décrit plus loin.

L'objet de ce stage a été d'étudier la sensibilité de la densité de drainage au choix du seuil hydrographique et à la résolution du MNT. L'objectif final était de proposer un seuil

de surface amont drainée optimal pour le réseau hydrographique global HydroSHEDS utilisé dans la thèse de [Schneider, 2015].

La première étape a été l'observation de la sensibilité de la densité de drainage au choix du seuil hydrographique. Puis, il a été déterminé un seuil optimal, et ce seuil optimal a été comparé pour différentes résolutions. Ensuite les erreurs sur l'emplacement des cours d'eau pour le seuil optimal ont été analysées. Enfin les seuils optimaux obtenus ont été comparés au seuil utilisé pour définir le réseau hydrographique global HydroSHEDS.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Présentation des données

Trois types de données ont été utilisées.

Le réseau hydrographique provenant de la base de données bidimensionnelle BD CARTHAGE (une base de données complète du réseau hydrographique français) a été utilisé. La BD CARTHAGE est produite par les Agences de l'eau à partir de la base de données cartographiques BD CARTO de l'IGN, qui elle est obtenue à partir de la numérisation des cartes au 1/50 000 de l'IGN et de l'imagerie spatiale SPOT. Sa précision est de l'ordre d'une vingtaine de mètres. [CAR, 2010]

Des Modèles Numériques de Terrain (MNT) à différentes résolutions ont été le support de ce travail. Un MNT est la représentation numérique du relief d'un terrain sans végétation ou constructions (terrain 'nu'). Les MNT sont sous la forme de grilles de pixels (c'est-à-dire de raster), avec chaque pixel contenant une information altimétrique. Les MNT sont obtenus à partir de la base de données BD ALTI de l'IGN. Cette dernière décrit la topographie de l'ensemble du territoire français. Ces données sont issues de la numérisation des cartes de l'IGN, de levés de terrain, et des la restitution photogramétrique de photos aériennes. [ALT, 2015]

Les MNT à disposition étaient les suivants : le MNT 500 de la France entière (un MNT avec une taille de pixel de  $500\text{m} \times 500\text{m}$ ), avec des extractions à l'échelle du bassin versant de la Seine et d'un plus petit bassin versant en Auvergne en amont de la Dordogne ; et les MNT 25 (avec une taille de pixel de  $25\text{m} \times 25\text{m}$ ) pour ces même bassins de la Seine et en Auvergne. Par la suite, on utilisera les termes 'MNT 500' pour se référer au MNT de résolution  $500\text{m} \times 500\text{m}$ , et 'MNT 25' pour le MNT de résolution  $25\text{m} \times 25\text{m}$ .

Le réseau hydrographique provenant de la base de données hydrographiques globales HydroSHEDS, développée principalement par le WWF Science Conservation Program, a été utilisé avec une résolution de  $15 \text{ arcsecondes} \times 15 \text{ arcsecondes}$  ( $15 \text{ arcsecondes}$  ou  $15''$  correspondent à environ  $500\text{m}$  à l'Equateur). Le réseau HydroSHEDS a été obtenu lors de la mission spatiale SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA en 2000, dans laquelle les données altimétriques de résolution  $5'' \times 5''$ ,  $15'' \times 15''$  et  $30'' \times 30''$  ont été obtenues par interférométrie. [Lehner *et al.*, 2008]

Enfin le logiciel utilisé pour traiter l'ensemble de ces données était ArcGIS 10.3, un système d'analyses géographiques qui permet le traitement et l'analyse de bases de données.

## 2.2 Extraction de bassins versants et de réseaux hydrographiques du MNT

Les réseaux hydrographiques ont été extraits selon une suite d'étapes détaillée dans la documentation ArcGIS en ligne ([Arc, 2013]). Ces étapes étaient les suivantes (une figure synthétique des quatre premières étapes 5 et une description plus exhaustive sont fournies en annexe :

- correction des cuvettes, des artefacts dûs à la résolution du MNT qui créent des discontinuités dans le réseau hydrographique ;
- calcul de la direction de flux c'est-à-dire la direction d'écoulement en chaque pixel, qui correspond à la direction de plus grande pente ;
- détermination du flux accumulé dans chaque pixel, sous la forme d'une somme cumulée de tous les pixels s'écoulant dans les pixels en pente descendante.

L'extraction d'un bassin versant se fait à partir de l'accumulation de flux, en deux étapes :

- placement du point exutoire (le point le plus bas du bassin versant, qui correspond au point de captation de toutes les eaux de ce bassin) : ce point est placé dans un pixel qui possède une grande accumulation de flux, c'est-à-dire dans lequel le flux cumulé est grand ;
- détermination et extraction de la surface de captation en amont du point exutoire : la surface obtenue correspond au bassin versant associée à ce point exutoire.

Puis on reprend l'extraction du réseau dans le bassin ainsi défini :

- définition d'un seuil hydrographique : ici se trouve l'étape cruciale. Le seuil hydrographique est une valeur que le modélisateur choisit, et qui correspond au flux d'accumulation minimal à partir duquel on considère un pixel comme un pixel cours d'eau (un pixel cours d'eau est un pixel qui a un flux cumulé assez important pour qu'on le considère comme un cours d'eau). Par exemple, en fixant un seuil hydrographique à 100 pixels, on considère comme pixels cours d'eau tous les pixels qui possèdent une accumulation de flux supérieure ou égale à 100 pixels, c'est-à-dire les pixels dans lesquels s'écoulent au moins 100 pixels en amont (voir l'étape 4 de la figure 5 en annexe pour une illustration). Le choix de ce seuil constitue donc une hypothèse de calcul importante. C'est l'enjeu majeur de ce stage. Ce seuil peut être défini soit en nombre de pixels amont drainés, soit en surface amont drainée :

$$Seuil_{surface} = Seuil_{pixel} \cdot Résolution \quad (2)$$

avec  $Seuil_{surface}$  le seuil hydrographique exprimé en surface amont drainée ( $m^2$ ),  $Seuil_{pixel}$  le seuil hydrographique exprimé en nombre de pixels amont drainés, et la résolution du MNT en  $m^2$ .

- définition des liaisons d'écoulement (une liaison d'écoulement est une section du réseau hydrographique située entre deux nœuds successifs) du réseau ainsi défini ;
- attribution d'un ordre d'écoulement aux liaisons d'écoulement ;
- conversion du réseau linéaire raster (pixelisé) représenté comme une unique entité linéaire, en réseau vectorisé représenté comme plusieurs entités linéaires.

Le calcul de la longueur totale des réseaux hydrographiques s'est fait grâce à un outil implémenté dans ArcGIS, qui calcule la somme des longueurs de chaque tronçon.

### **3 Sensibilité de la densité de drainage au choix du seuil hydrographique**

On a commencé par étudier la sensibilité de la densité de drainage au choix du seuil hydrographique.

#### **Hypothèse**

Quand le seuil hydrographique est faible, plus de pixels sont considérés comme des pixels cours d'eau. Cela signifie que plus le seuil est faible, plus les pixels cours d'eau sont nombreux, et donc plus la longueur totale du réseau (et en conséquence la densité de drainage) est importante.

#### **Méthodologie**

Le travail a été effectué sur le plus petit bassin versant à disposition, celui en Auvergne, pour avoir un premier cas d'étude simple et de petite taille. On a d'abord travaillé à la plus basse résolution, c'est-à-dire sur le MNT 500 de ce bassin, pour limiter le temps de calcul. Des réseaux hydrographiques ont été extraits pour plusieurs seuils. La longueur totale de chaque réseau obtenu a été calculée à l'aide de fonctionnalités du logiciel ArcGIS, puis la densité de drainage a été obtenue avec l'équation (1).

#### **Résultats**

La figure 1, montre que pour une résolution de MNT donnée, les réseaux hydrographiques obtenus pour différents seuils hydrographiques sont différents. Plus ce seuil est faible, plus le réseau hydrographique apparaît dense. Cette figure met en évidence une sensibilité de la longueur du réseau hydrographique et de la densité de drainage au choix du seuil. En effet plus le seuil est faible, plus la longueur du réseau et la densité de drainage augmentent, ce qui confirme l'hypothèse. Concernant la longueur du réseau hydrographique, lorsqu'on diminue le seuil d'un facteur 10, de  $25 \text{ km}^2$  à  $2.5 \text{ km}^2$ , la longueur du réseau est environ 2.5 fois plus importante et on change d'ordre de grandeur. Beaucoup plus de sous branches sont représentées, alors qu'avec des seuils élevés seules les branches principales sont conservées. Concernant la densité de drainage, quand on

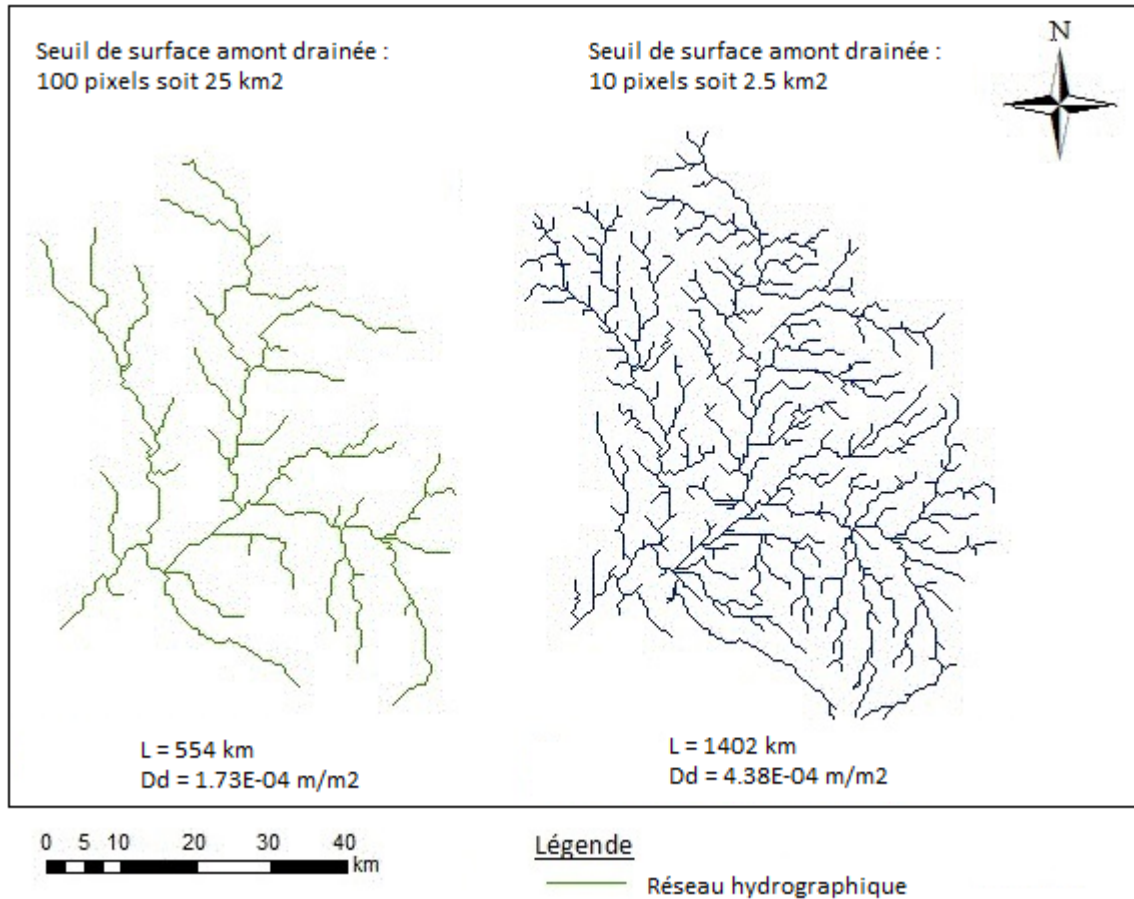


FIGURE 1: Comparaison de la densité de drainage en fonction du seuil choisi  
*Bassin versant d’Auvergne à la résolution de 500m×500m*

passé au seuil de 2.5 km<sup>2</sup> la densité de drainage est aussi 2.5 fois plus importante, mais les ordres de grandeur restent les mêmes (ordre de 10<sup>-4</sup>m/m<sup>2</sup>).

On représente figure 2 la densité de drainage en fonction du seuil (en surface amont drainée) pour le MNT 500 du bassin versant en Auvergne.

Afin de caractériser la loi théorique qui se rapproche au mieux la courbe expérimentale de la figure 2, un ajustement en loi puissance a été effectué. Le coefficient de détermination  $R^2$  entre les deux courbes est relativement proche de 1 (0.9913). La courbe est donc bien représentée par une loi de puissance. [Horton, 1945] montre que beaucoup de paramètres hydrographiques dans un bassin versant sont liées par des lois puissance, mais aucune liant le seuil et la densité de drainage n’est citée. Ce résultat pourrait donc être intéressant.

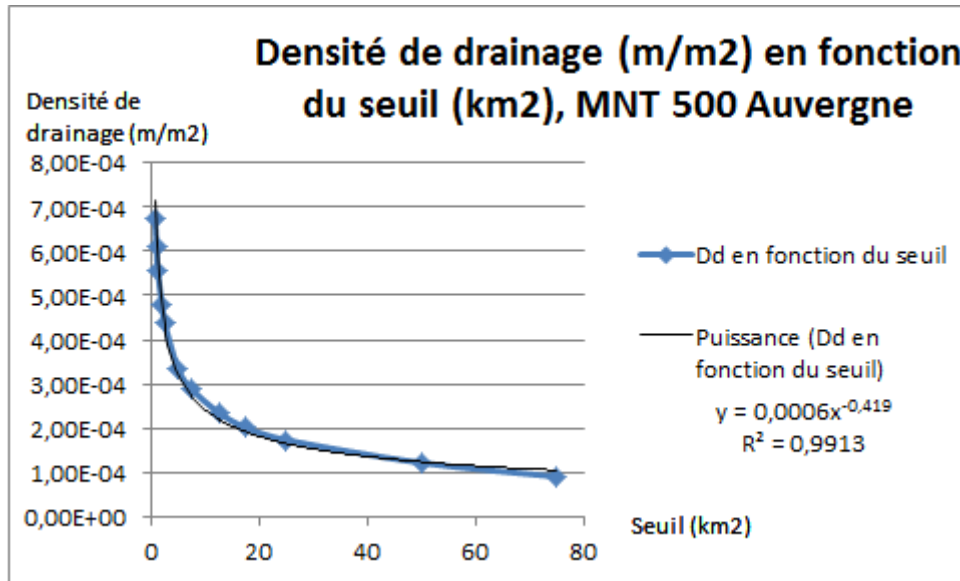


FIGURE 2: Courbe de la densité de drainage en fonction du seuil hydrographique, pour le MNT 500 du bassin versant en Auvergne

#### 4 Détermination d'un seuil optimal, et comparaison de ce seuil pour différentes résolutions

Toujours dans le bassin Auvergnat, on a cherché, pour les MNT de résolution 500m×500m et 25m×25m, les seuils optimaux qui donneraient une longueur de réseau (et une densité de drainage) approchant le mieux les valeurs de la BD CARTHAGE de l'IGN, prise comme référence. Ces seuils ont été comparés entre eux.

##### Hypothèse

A haute résolution il y a plus de pixels pour un même bassin. Pour un seuil fixé, il y a plus de pixels cours d'eau à haute résolution qu'à basse résolution. Le seuil hydrographique optimal à haute résolution serait en conséquence plus élevé que le seuil hydrographique à basse résolution.

##### Méthodologie

L'étude a été poursuivie sur le bassin versant en Auvergne, puisqu'un certain nombre de seuils pour les MNT 500 de ce bassin avaient déjà été testés. Pour comparer les seuils optimaux à différentes résolutions, le MNT 25 de ce même bassin a été étudié pour garder une surface de bassin versant du même ordre de grandeur. Pour ces deux résolutions, des réseaux hydrographiques ont été extraits pour différents seuils. Les longueurs des réseaux et densités de drainage ont été calculées jusqu'à trouver un seuil optimal permettant de



se rapprocher au mieux des valeurs obtenues avec l'hydro carthage IGN. Nous avons donc considéré le réseau hydrographique fourni par l'IGN comme le réseau de référence, en faisant l'hypothèse que les valeurs de la BD CARTHAGE sont celles qui se rapprochent le plus de la réalité.

## Résultats

Les résultats sont présentés en annexe dans la figure 3. Une illustration des réseaux hydrographiques obtenus avec les seuils optimaux sont présentés en annexe (figure 6).

On obtient un seuil hydrographique optimal de 4 pixels pour le MNT 500, et de 2804 pixels pour le MNT 25. Autrement dit, pour le MNT 500 on désigne comme 'pixel cours d'eau' les pixels qui ont une aire drainante supérieure ou égale à  $1 \text{ km}^2$ , et pour le MNT 25 ceux qui ont une aire drainante supérieure ou égale à  $1.8 \text{ km}^2$ . Plus la résolution est fine, plus le seuil hydrographique optimal est élevé, ce qui confirme notre hypothèse de départ.

Une fois les seuils optimaux déterminés, ces derniers ont été calculés pour le bassin de la Seine pour les résolutions 500m et 25m. Puis ces seuils ont été comparés avec le seuil hydrographique utilisé par HydroSHEDS.

## 5 Emplacement des pixels cours d'eau et erreurs associées.

On cherche à savoir si malgré avec un seuil hydrographique optimal, qui donne une longueur de réseau hydrographique ajustée à la longueur du carthage, il peut quand même exister des erreurs sur l'emplacement du réseau hydrographique dérivé du MNT.

Deux types d'erreurs dans l'emplacement des réseaux dérivés des MNT sont observées. Le premier type d'erreur correspond au cas où un pixel est identifié comme un cours d'eau d'après le MNT mais n'est pas traversé par un cours d'eau carthage : le réseau obtenu par le MNT est trop long par rapport à la réalité. Le deuxième type d'erreur correspond à un pixel non identifié comme cours d'eau sur le MNT alors qu'il est traversé par le réseau carthage : le réseau obtenu avec le MNT est trop court par rapport à la réalité.

## Méthodologie

On a commencé l'étude sur un bassin versant contenant très peu de pixels, pour pouvoir compter les pixels manuellement et vérifier que la méthode employée est correcte. A ce titre, un très petit sous-bassin au Sud-Est du bassin versant de la Seine a été choisi, à la résolution  $500\text{m} \times 500\text{m}$ . Le réseau hydrographique de ce bassin ne comportait que quelques ramifications. Une fois la méthode vérifiée, elle a été appliquée au bassin versant en Auvergne à la résolution  $500\text{m} \times 500\text{m}$ . (voir figure 3)

Trois types de pixels ont été répertoriés, à l'aide d'outils de sélection sur ArcGIS :

- les pixels considérés comme des pixels cours d'eau sur le MNT et également traversés par le réseau de l'IGN

- les pixels incorrectement identifiés comme cours d'eau sur le MNT : erreurs de type 1
- les pixels incorrectement identifiés comme non-cours d'eau sur le MNT : erreurs de type 2

## Résultats

On trouve que la proportion d'erreurs de type 1 est plus importante que la proportion de cours d'eau correctement identifiés (figure 4). Cependant, cette méthode pose plusieurs problèmes. Tout d'abord, des branches entières sont sélectionnées comme erreurs de type 1 alors qu'elles sont bien représentées sur le MNT, mais seulement décalées d'un pixel. Ensuite, cette méthode est appliquée sur des bassins versants déjà définis. Les branches du réseau qui ne sont pas considérées comme faisant partie du bassin versant ne sont pas comptabilisées (ce qu'on peut observer sur la figure 3 à l'Ouest du bassin versant). Pour éliminer le premier type d'erreur, il pourrait être essayé de trouver une option qui sélectionne les erreurs de type 1 en fonction de la distance du réseau carthage au réseau dérivé du MNT. Il serait intéressant, une fois une autre méthode trouvée, de trouver comment évoluent les erreurs en fonction de la résolution du MNT, pour les seuils optimaux. Une hypothèse est les erreurs diminueraient quand la résolution du MNT augmente. Ceci serait dû au fait que le réseau à plus haute résolution est plus précis, car le pixel étant plus petit, les informations topographiques sont plus précises et moins grossières que pour la résolution 500.

## 6 Comparaison des seuils hydrographiques optimaux obtenus avec le seuil hydrographique utilisé par HydroSHEDS

### Méthodologie

Dans la thèse d'A. Schneider, la densité de drainage a été calculée à partir du réseau hydrographique global HydroSHEDS à la résolution de  $15'' \times 15''$ , avec une valeur par défaut de 100 pixels pour le seuil hydrographique (également le seuil par défaut utilisé dans la version de HydroSHEDS de résolution  $30'' \times 30''$ );

La densité de drainage a été calculée dans des mailles régulières de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Au sein de chaque maille, la longueur totale du réseau hydrographique a été calculée (la somme des longueurs de tous les tronçons hydrographiques contenus dans la maille), puis la densité de drainage avec l'équation 1.

On a cherché à comparer la densité de drainage moyenne de la France obtenue avec ce seuil hydrographique de 100 pixels, à la densité de drainage moyenne qui serait obtenue avec un seuil optimal.

Pour obtenir la densité de drainage moyenne sur la France avec le seuil hydrographique de 100 pixels, on a effectué une moyenne pondérée par les surfaces des mailles, des densités de drainage obtenues dans les travaux d'A. Schneider sur la France.

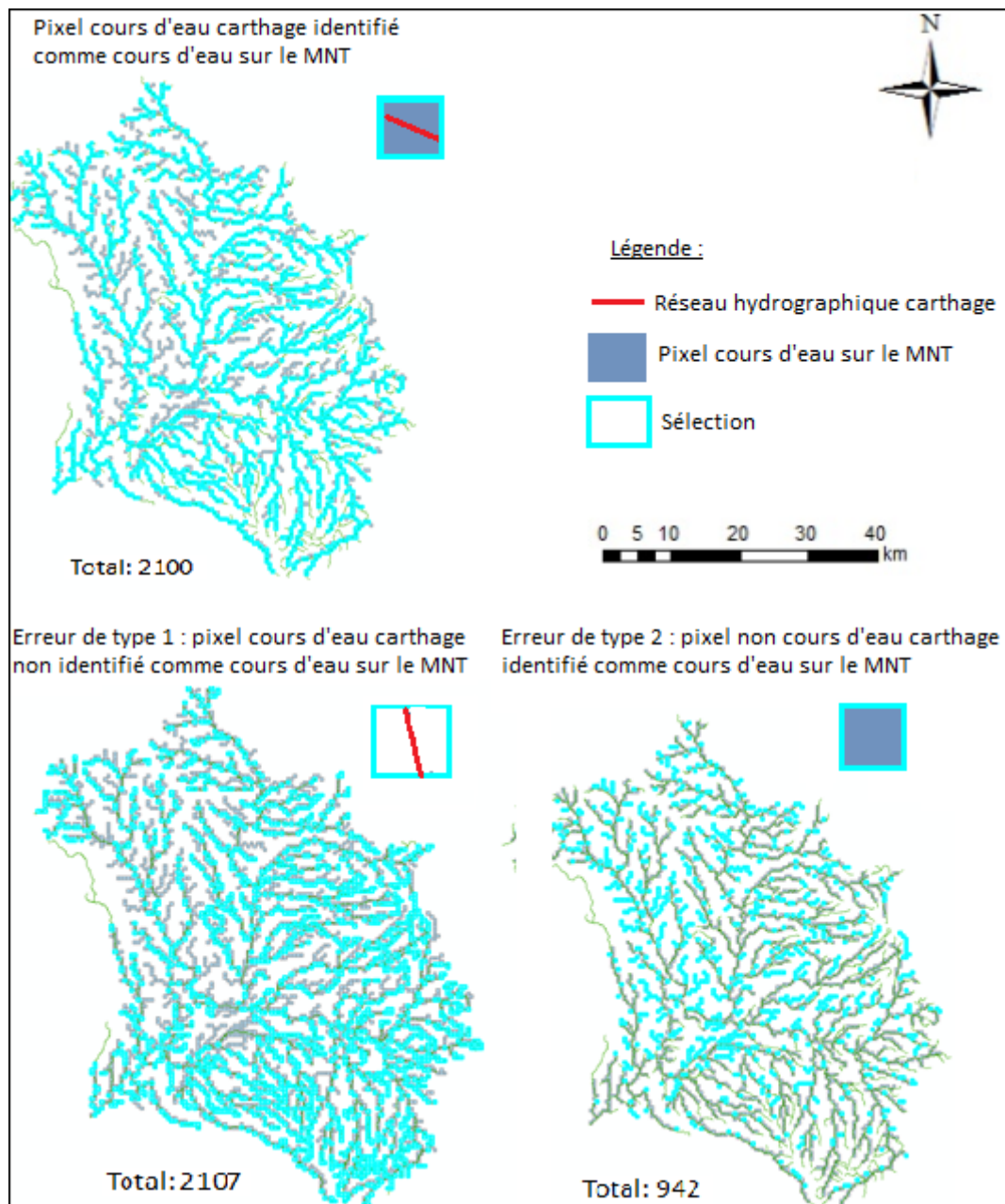


FIGURE 3: Emplacement des erreurs sur la localisation des cours d'eau  
*MNT 500 du bassin versant en Auvergne*

Pour la détermination d'un seuil optimal, le MNT 500 de la France a été utilisé. En effet, 15 arcsecondes valent environ 500m à l'Equateur, donc les résolutions de 15"×15" et 500m×500m sont comparables.

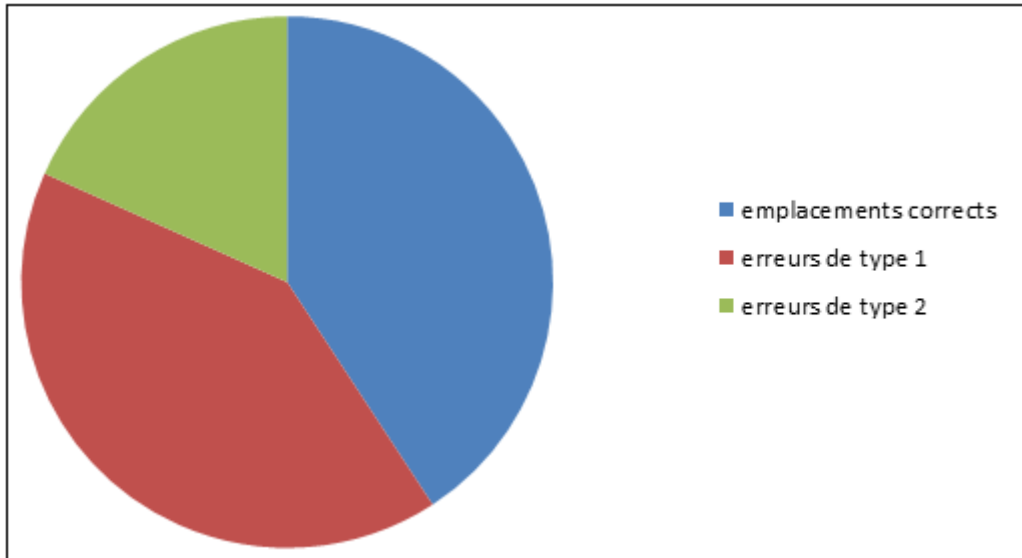


FIGURE 4: Pourcentage des différentes erreurs sur la localisation des cours d'eau MNT 500, bassin versant en Auvergne

Pour trouver le seuil hydrographique optimal sur le MNT 500 la France, la densité de drainage a été calculée de deux manières :

- **méthode 1** : un maillage de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  a été créé sur le MNT 500 de la France, puis la densité de drainage dans chaque maille a été calculée en utilisant la même méthode que celle employée par A. Schneider (la moyenne sur la France a ensuite été calculé de la même manière que précédemment, en pondérant par les surfaces des mailles) ;
- **méthode 2** : la densité de drainage a été calculée directement à l'échelle de la France avec l'équation 1, en divisant la longueur totale du réseau hydrographique sur la France par la surface de la France.

On a effectué les calculs des deux manières différentes pour vérifier que les deux méthodes donnent les même résultats.

## Résultats

Remarques préliminaires :

- Pour les MNT 500 et 25, pour les bassins en Auvergne et de la Seine, les surfaces de bassins versants ne sont pas les mêmes. C'est parce qu'en changeant de résolution, la direction de flux et donc l'accumulation de flux varient légèrement.
- L'erreur relative sur la longueur du réseau hydrographique est donnée par la différence de la longueur trouvée avec le MNT et la longueur de référence, sur la longueur de référence. Une erreur relative négative signifie un manque de branches sur le réseau MNT par rapport au carthage, alors qu'une erreur relative positive traduit des

	Résolution (pixels)	Seuil (pixels)	Seuil (km <sup>2</sup> )	L (km)	S (km <sup>2</sup> )	Dd moyenne (m/m <sup>2</sup> )	Erreur relative sur L (%)	L référence (km)
France 0.5°	500	2	0,5	448711	550694	8,12E-04	5,2	426667,14
France entière	500	3	0,75	392323	550694	7,12E-04	-8,0	426667,14
France 0.5°	500	100	25	86838	550694	1,98E-04	-79,6	426667,14
France entière	500	100	25	86811	550694	1,58E-04	-79,7	426667,14

TABLE 1: Comparaison des valeurs obtenues sur la France avec les deux méthodes, pour différents seuils

*MNT 500 de la France entière*

*Seuils hydrographiques : optimaux (orange), de 100 pixels(vert)*

	Résolution pixels (m)	Seuil (pixels)	Seuil (km <sup>2</sup> )	L (km)	S (km <sup>2</sup> )	Dd moyenne (m/m <sup>2</sup> )	Erreur relative sur L (%)	L référence (km)
BV Auvergne	500	4	1	1956	3204	6,11E-04	3,5	1890
	25	2804	1,753	1894	3268	5,80E-04	-0,004	1894
BV Seine	500	5	1,25	42545	75240	5,70E-04	1,4	41946
	25	2815	1,759	42511	76273	5,57E-04	-0,045	42530
France entière	500	3	0,75	392323	550694	7,12E-04	-8,0	426667
BV Auvergne	500	100	25	554	3204	1,73E-04	-70,7	1890
	25	100	0,0625	8320	3268	9,63E-03	339,2	1894
BV Seine	500	100	25	11789	75240	1,57E-04	-71,9	41946
	25	100	0,0625	199752	76273	2,62E-03	369,7	42530
France entière	500	100	25	86811	550694	1,58E-04	-79,7	426667
France HydroSHEDS 15"	500	100	25	151201		2,42E-04	-64,6	426667
BV Auvergne	500	4	1	1956	3204	6,11E-04	3,5	1890
	25	1600	1	2390	3268	7,31E-04	26,2	1894
BV Seine	500	4	1	46195	75240	6,14E-04	10,1	41946
	25	1600	1	55694	76273	7,30E-04	31,0	42530
France entière	500	4	1	354436	550694	6,44E-04	-16,9	426667
BV Auvergne	500	8	2	1531	3204	4,78E-04	-19,0	1890
	25	3200	2	1789	3268	5,47E-04	-5,6	1894
BV Seine	500	8	2	35840	75240	4,76E-04	-14,6	41946
	25	3200	2	39999	76273	5,24E-04	-6,0	42530
France entière	500	8	2	271429	550694	4,93E-04	-36,4	426667

TABLE 2: Comparaison des longueurs de réseau et des densités de drainage obtenues pour deux résolutions de MNT (500m×500m et 25m×25m) et pour des seuils hydrographiques différents

*Seuils hydrographiques : optimaux (orange), de 100 pixels(vert), de 1 km<sup>2</sup> (bleu clair), de 2 km<sup>2</sup> (bleu foncé)*

*Dans ce tableau les données utilisées pour la France sont celles obtenues avec la méthode 2. Les longueurs de références utilisées sont : le carthage de l'IGN sur le bassin versant en Auvergne, le carthage de l'IGN sur le bassin de la Seine et enfin le carthage IGN sur la France entière.*

branches de trop sur le réseau MNT par rapport au carthage. Pour comparer les différents seuils on va s'intéresser aux erreurs relatives sur la longueur des réseaux hydrographiques.

**Comparaison des deux méthodes** Pour un seuil hydrographique de 100 pixels, des valeurs similaires sont obtenues pour les erreurs relatives sur la longueur et sur la densité de drainage. Cependant on obtient un seuil hydrographique idéal différent avec les deux méthodes (écart de 12.5%).

#### **Détermination de seuils optimaux pour les résolutions de MNT de 500m et 25m**

Les seuils optimaux sont ceux pour lesquels l'erreur relative est la plus faible (inférieure à 10 %), sur tous les seuils présentés. Elle est encore plus faible pour la résolution 25m (inférieure à  $10^{-2}$  %). Le MNT 25 donnerait donc un réseau plus précis en termes de longueur que le MNT 500, ce qui semble logique car l'information topographique est plus précise dans le cas du MNT 25. Les seuils de surface amont drainée pour chaque résolution étant assez proches, il paraît acceptable de faire une moyenne sur le seuil, pour obtenir un seuil optimal moyen. On trouve que pour un MNT 500 le seuil optimal moyen est d'environ  $1 \text{ km}^2$ , et que pour un MNT 25 il est d'environ  $2 \text{ km}^2$  (on arrondit ces seuils à des nombres entiers).

C'est pour vérifier ces hypothèses les erreurs relatives sur la longueur pour des seuils de  $1 \text{ km}^2$  et de  $2 \text{ km}^2$  sont testés. On observe bien que les erreurs minimales sont obtenues avec un seuil de  $1 \text{ km}^2$  pour les MNT 500 et avec un seuil de  $2 \text{ km}^2$  pour les MNT 25.

Ces seuils optimaux seraient applicables dans le cas où le réseau de référence est le carthage de l'IGN. Ils ne seraient pas forcément les seuils hydrographiques optimaux pour une autre région du monde qui utilise un autre réseau de référence.

#### **Analyse du seuil par défaut proposé par HydroSHEDS, proposition d'un nouveau seuil**

Avec un seuil hydrographique de 100 pixels, les erreurs relatives sur la longueur sont très grandes, de l'ordre de -70 % pour les MNT 500 et de +350 % pour les MNT 25. C'est normal car dans le premier cas le seuil est supérieur au seuil optimal donc moins de pixels sont définis comme pixels cours d'eau, alors que dans le deuxième cas le seuil est environ 28 fois inférieur au seuil optimal, donc plus de pixels sont définis comme cours d'eau.

On observe que l'erreur relative sur la longueur pour le réseau HydroSHEDS, est très importante (-64.6 %), et est très similaire aux valeurs obtenues pour les MNT 500 des différents bassins. La valeur de seuil par défaut de 100 pixels n'est donc pas adaptée pour obtenir des densités de drainages correctes sur la France. La résolution de 15 arcsecondes étant similaire à la résolution de 500m, et au vue des similarités entre les erreurs relatives de ces derniers, on propose d'utiliser un seuil hydrographique de  $1 \text{ km}^2$  pour le calcul des densités de drainage et des temps de résidence à l'échelle globale.

## 7 Conclusion

Ce stage a permis, par étapes, de proposer un seuil hydrographique optimal pour le réseau HydroSHEDS à 15 arcsecondes, grâce à l'étude progressive de la sensibilité de la densité de drainage au choix du seuil hydrographique et à la résolution. Le début du travail a consisté en l'observation de la sensibilité de la densité de drainage au choix du seuil et à la résolution. Il a été trouvé que plus le seuil est faible, plus la longueur du réseau et la densité de drainage augmentent, et que plus la résolution est élevée plus la densité de drainage est élevée, à seuil constant. Puis la recherche d'un seuil optimal, qui donnerait des densités de drainage approchant au mieux la réalité, a commencé. Il a fallu définir un réseau de référence, le plus réaliste, que nous avons choisi comme le réseau carthage de l'IGN pour la France. En cherchant à définir ce seuil optimal, un résultat parallèle intéressant a été obtenu : une loi puissance est la loi qui ajusterait au mieux la courbe de la densité de drainage en fonction du seuil de surface amont drainée. Il a été trouvé que même avec un seuil optimal, il existe des erreurs sur l'emplacement du réseau hydrographique, mais la méthode de détection de ces erreurs reste à développer.

Des seuils optimaux ont été calculés pour différents bassins (Auvergne, Seine, France entière) aux résolutions de 500m et 25m. Il a été proposé que le seuil optimal pour un MNT 500 serait un seuil de surface amont drainée de  $1km^2$ , et que pour un MNT 25 ce seuil optimal serait de  $2km^2$ . La densité de drainage moyenne de la France obtenue avec le réseau HydroSHEDS à 15 arcsecondes possède une erreur relative sur la longueur du réseau importante de -70%. Pour obtenir une longueur de réseau et donc une densité de drainage correcte sur la France avec HydroSHEDS à 15 arcsecondes, on recommande d'utiliser un seuil de  $1 km^2$ .

## 8 Remerciements

Ce stage de L3 a été effectué dans l'UMR Metis de l'Université Pierre et Marie Curie, sous la direction d'Agnès Ducharne, que je voudrais remercier pour ses explications et sa patience. Je voudrais également remercier Ana Schneider, doctorante, pour sa gentillesse et le temps passé à m'expliquer son travail et à résoudre les problèmes informatiques. Merci à Aurélien Baro, Marie Sylvestre et Sylvain Théry pour leurs explications sur le fonctionnement d'ArcGIS et leur aide, et leur patience face à mes questions récurrentes.

## 9 Références Bibliographiques

### Références

- [Arc, 2013] (2013). Aide arcgis 10.3. <http://resources.arcgis.com/fr/help/main/10.1/index.html//009z0000004w000000>.
- [ALT, 2015] (Avril 2015). *BD ALTI Version 2.0 - Descriptif de contenu*. [http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC\\_BDALTI2\\_0.pdf](http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_BDALTI2_0.pdf).

- [Hyd, 2008] (Octobre 2008). *New global hydrography derived from spaceborne elevation data*. Eos, Transactions, AGU. p10,18.
- [CAR, 2010] (Octobre 2010). *BD CARTO Version 3.1 - Descriptif de contenu*. IGN. 4.
- [Horton, 1945] HORTON, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins : hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 56.
- [Lehner *et al.*, 2008] LEHNER, B., VERDIN, K. et JARVIS, A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, AGU*, 89(10).
- [Schneider, 2015] SCHNEIDER, A. (Janvier 2015). Vers une modélisation simple et flexible des eaux souterraines à l'échelle globale. Rapport de mi-parcours de thèse, UPMC.
- [Tarboton *et al.*, 1991] TARBOTON, D. G., BRAS, R. L. et RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5.

## 10 Annexe

### Formule de la constante de temps en fonction de la densité de drainage ( )

$$\mathcal{T} = \frac{\eta_e}{\pi^2 \cdot T_e \cdot Dd^2} \quad (3)$$

où  $\mathcal{T}$  est la constante de temps en jours,  $\eta_e$  est la porosité effective (sans unité),  $T_e$  est la transmissivité hydraulique effective en  $m^2/s^{-1}$  et  $Dd$  est la densité de drainage en  $m/m^2$ .

### Détail des premières étapes d'extraction du réseau hydrographique

- Correction des cuvettes. On appelle cuvette un pixel qui est entouré par des pixels de plus haute altitude. La direction de flux d'une cuvette est indéterminée, ce qui crée des discontinuités dans le réseau hydrographique. L'étape de correction des cuvettes, aussi appelée 'remplissage', consiste à remonter l'altitude de la cuvette au même niveau que celle du pixel adjacent de plus basse altitude. Les cuvettes prennent pour direction de flux ce pixel adjacent de plus basse altitude.
- Calcul de la direction de flux. Ce calcul repose sur un modèle de flux à huit directions (approche de Jenson et Domingue, 1988). Les huit directions d'écoulement possibles correspondent aux huit pixels adjacents (5), à chaque direction on associe un nombre (par exemple à la direction Est on attribut le chiffre 1, pour l'Ouest le nombre 16). Pour calculer la direction de flux d'un pixel, un algorithme calcule la pente entre le pixel central et chacun de ses pixels adjacents, et la plus grande pente est sélectionnée ( $\Delta z_{max}$ ). La direction de flux du pixel correspond alors à la dérivée du MNT :

$$Direction_{flux} = \frac{\Delta z_{max}}{distance_{pixels}} \cdot 100 \quad (4)$$

où  $distance_{pixels}$  est la la distance entre les deux pixels. En sortie, le pixel porte le numéro qui représente cette direction.



- Calcul de l'accumulation de flux. L'algorithme calcule une pondération cumulée de toutes les pixels s'écoulant dans chaque pixel en pente descendante. Les pixels en sortie avec une accumulation de flux élevée sont des zones de flux concentré qui peuvent être utilisées pour identifier des canaux d'écoulement.

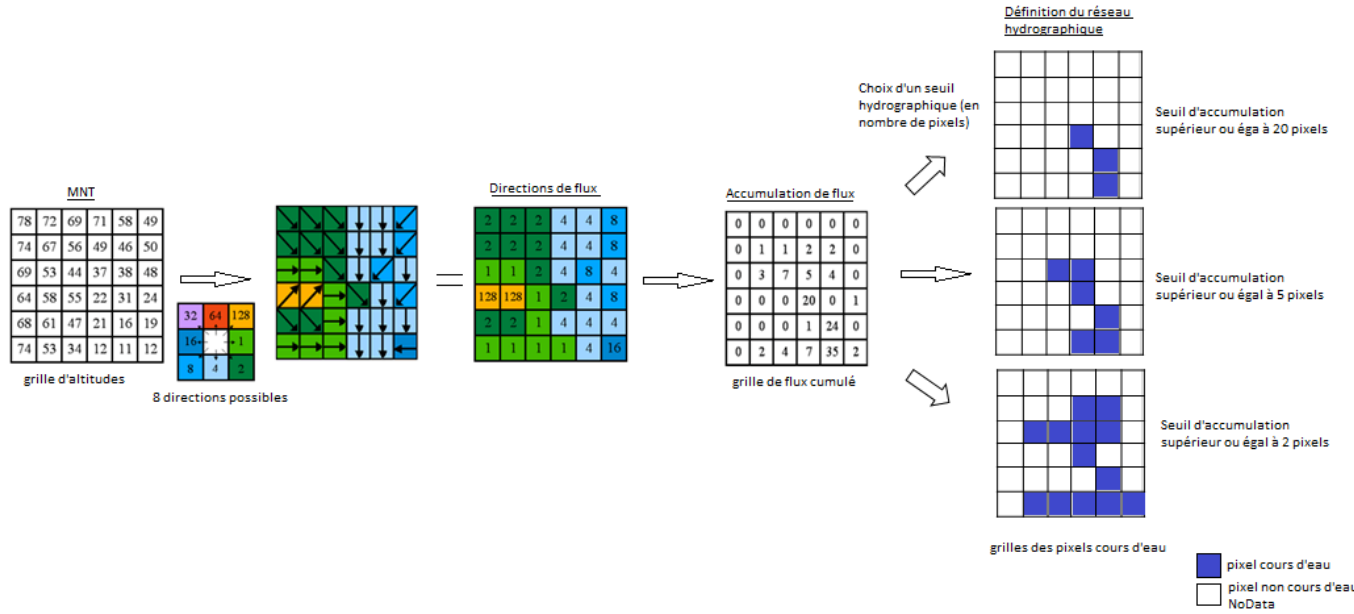


FIGURE 5: Du MNT à la définition d'un pixel cours d'eau. Adapté de [Arc, 2013]  
Le MNT de base a ici déjà été corrigé de ses cuvettes

	seuil (pixels)	seuil (km2)	L (km)	Dd (m/m2)
MNT 500	3	0,75	2165	6,76E-04
	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>1956</b>	<b>6,11E-04</b>
	5	1,25	1784	5,57E-04
	8	2	1531	4,78E-04
	10	2,5	1402	4,38E-04
	20	5	1071	3,34E-04
	30	7,5	924	2,88E-04
	50	12,5	755	2,36E-04
	70	17,5	643	2,01E-04
	100	25	554	1,73E-04
	200	50	388	1,21E-04
	300	75	288	8,99E-05
Carthage			<b>1890</b>	<b>5,90E-04</b>

	seuil (pixels)	seuil (km2)	L (km)	Dd (m/m2)
MNT 25	100	0,06	8320	2,55E-03
	300	0,19	4979	1,52E-03
	500	0,31	3964	1,21E-03
	1000	0,63	2895	8,86E-04
	1600	1	2390	7,31E-04
	2000	1,25	2176	6,66E-04
	2500	1,56	1981	6,06E-04
	2800	1,75	1896	5,80E-04
	2802	1,751	1895	5,80E-04
	2803	1,752	1895	5,80E-04
	<b>2804</b>	<b>1,753</b>	<b>1894</b>	<b>5,80E-04</b>
	2850	1,78	1881	5,76E-04
	2900	1,81	1867	5,71E-04
	3000	1,88	1839	5,63E-04
	3200	2	1789	5,47E-04
Carthage			<b>1894</b>	<b>5,80E-04</b>

TABLE 3: Longueur de réseau et densité de drainage pour différents seuils, pour les MNT 500 et 25

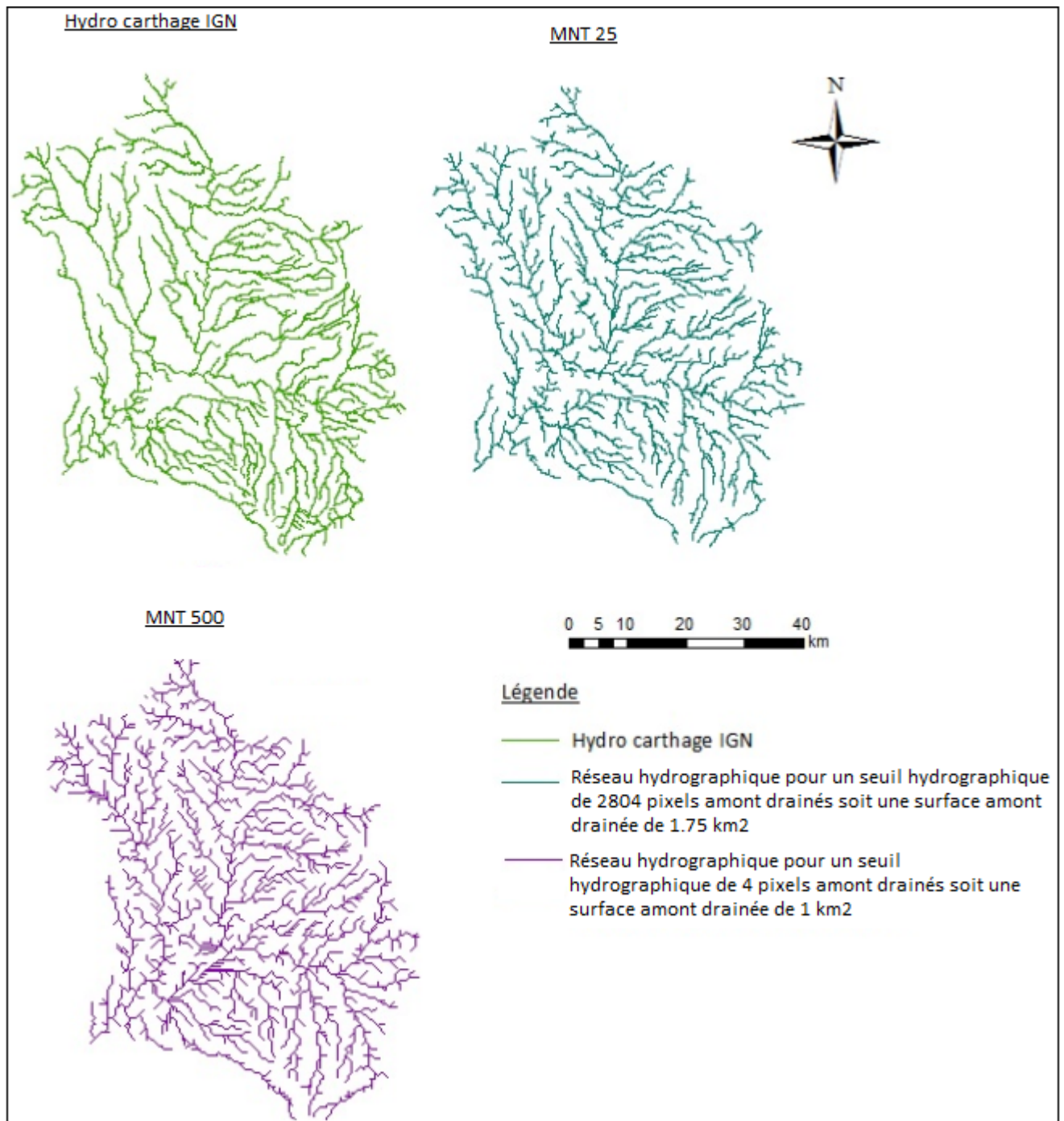


FIGURE 6: Du MNT à la définition du réseau hydrographique  
Le MNT de base a ici déjà été corrigé de ses cuvettes