



## **Département des Sciences de la Terre**

### **Licence Sciences et Techniques Eau et Environnement**

#### **Mémoire de projet de fin d'étude**

# **LES CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET GÉOMORPHOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT D'OUED AMLÉN**

Réalisé par :

- ALBOUCHOUARI Abdellah
- ASBAA Naima
- AOUIZIOU Hafida

Sous la Direction de :

M. AZIZI Abdelfattah (FST, Marrakech)

M. ELHALIM Mouhsin (FST, Marrakech)

Soutenu le : 19 Juin 2023

Devant la commission d'examen composée de :

M. Mohamed Elmehdi SAIDI, (FST, Marrakech)

M. AZIZI Abdelfattah (FST, Marrakech)

M. ELHALIM Mouhsin (FST, Marrakech)

## Remerciements

À l'issue de ce projet, nous souhaitons exprimer notre sincère reconnaissance envers tous ceux qui nous ont apporté leur aide et leur collaboration précieuse, à commencer par nos chers parents. Votre soutien inestimable tout au long de nos études nous remplit de gratitude sincère.

De plus, nous tenons à remercier tout particulièrement nos encadrants, M. ABDELFAHATTAH AZIZI et M. Halim Mouhsin. Leur présence et leurs conseils tout au long de cette période de travail ont été d'une grande valeur pour nous. Leur soutien inestimable et leur suivi constant nous ont été précieux.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers M. ELMEHDI SAIDI, dont l'assistance tout au long de notre projet de fin d'études a été essentielle. Leur expertise et leur disponibilité ont grandement contribué à notre réussite.

Par ailleurs, nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance envers tout le personnel de la commune rurale Amlen. Leur accueil chaleureux et leur soutien durant notre sortie ont été très appréciés. Leur collaboration a été un atout précieux pour mener à bien notre projet.

Enfin, nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à l'ensemble du corps professoral et administratif de la faculté des Sciences et Techniques de Marrakech (FSTG). Leur dévouement et leur engagement à notre égard ont été exemplaires tout au long de notre période d'études. Leur enseignement de qualité et leurs conseils éclairés ont contribué à notre formation académique et professionnelle.

Nous sommes conscients que notre réussite est le fruit d'un travail d'équipe et de l'appui de nombreuses personnes. Nous tenons à leur exprimer notre plus profonde gratitude pour leur contribution précieuse à notre parcours.

*« L'eau n'oublie pas son chemin »*

## Résumé

Les bassins versants jouent un rôle crucial dans l'économie du pays, ce qui justifie leur étude approfondie sous tous les aspects. Le bassin versant d'Amlen est situé au sud du Maroc à Tafraout, dans la région de Souss-Massa, et occupe une superficie de  $288\text{Km}^2$ .

La région se caractérise par la diversité de sa topographie et la dépendance de son économie au tourisme en raison de ses nombreux paysages naturels, ainsi que par un climat semi-aride et peu pluvieux.

Notre objectif principal est de mener une étude sur le bassin afin de déterminer ses caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques, à l'aide des images satellitaires, nous pourrions déterminer différents indicateurs tels que l'indice de végétation, l'indice d'eau et l'indice de sol, dans les périodes d'été et d'hiver.

Grâce à ces études, nous avons pu observer et suivre les évolutions du couvert végétal, révélant une densité significative en hiver par rapport à l'été, ainsi que la rareté de l'eau et sa rapide épuisement en raison du climat et des caractéristiques géologiques de la région.

Le calcul de l'indice de sol dans le bassin étudié a montré l'absence de sol fertile dans les zones à haute altitude et à fortes pentes et sa présence dans les zones à faible altitude.

Les différents calculs des paramètres ont montré que le bassin versant est trois fois plus long que large ainsi, le temps qu'il faut à une goutte d'eau pour atteindre l'exutoire est d'environ 5 heures, ce qui nous explique qu'il existe une possibilité de crues intenses dans la région.

Tous ces résultats nous offrent plusieurs suggestions potentielles pour la création de projets qui répondent aux circonstances et aux conditions de la région d'Amlen.

## Abstract

Watersheds play a crucial role in the country's economy, which justifies their in-depth study from all aspects. The Amlen watershed is located in the south of Morocco in Tafraout, in the Souss-Massa region, and covers an area of 288 km<sup>2</sup>.

The region is characterized by its diverse topography and its economy's dependence on tourism due to its numerous natural landscapes, as well as a semi-arid and low-rainfall climate.

Our main objective is to conduct a study on the watershed to determine its hydrological and geomorphological characteristics. Using satellite images, we can determine various indicators such as vegetation index, water index, and soil index, during the summer and winter periods.

Through these studies, we have been able to observe and track changes in vegetation cover, revealing a significant density in winter compared to summer, as well as the scarcity of water and its rapid depletion due to the region's climate and geological characteristics.

The calculation of the soil index in the studied watershed has shown the absence of fertile soil in high-altitude and steep slope areas, and its presence in low-altitude areas.

The different parameter calculations have shown that the watershed is three times longer than its width, and thus, the time it takes for a water droplet to reach the outlet is approximately 5 hours, explaining the possibility of intense floods in the region.

All these results offer us several potential suggestions for the creation of projects that cater to the circumstances and conditions of the Amlen region.

## خلاصة

تشغل الاحواض المائية أهمية كبيرة في اقتصاد البلاد مما يستدعي دراستها من كافة الجوانب، يقع الحوض المائي املن في جنوب المغرب بتفراوات جهة سوس ماسة ويشغل مساحة تقدر ب 288 كلم مربع.

تتسم المنطقة بتنوع تضاريسها وبعتماد اقتصادها على السياحة نظرا لتمييزها بعدة مناظر طبيعية كما انها تتميز بمناخ شبه جاف وكذا ندرة التساقطات المطرية.

هدفنا الأساسي هو احداث دراسة حول الحوض المائي املن بغية تحديد خصائصه الهيدرولوجية والمورفولوجية، باستخدام صور الأقمار الاصطناعية سنكون قادرين على تحديد مؤشرات مختلفة مثل مؤشر الغطاء النباتي ومساحات المياه ومؤشر التربة وذلك في كلا فترات الصيف والشتاء.

كل هذه الدراسات امكنتنا من تخلص ومتابعة تغيرات الغطاء النباتي التي اوضحت بشكل ملحوظ كثافة هامة للغطاء النباتي في فترة الشتاء مقارنة بفترة الصيف، كما يلاحظ ندرة المياه وسرعة نفاذيتها نظرا لطبيعة المناخ وطبيعة الطبقات الجيولوجية للمنطقة .

حساب مؤشر التربة في الحوض المدروس اوضح غياب التربة الخصبة في المناطق ذات ارتفاعات عالية ومنحدرات قوية وتواجدها في المناطق ذات ارتفاعات منخفضة.

إن مختلف الحسابات الهندسية بينت أن طول الحوض المائي أكبر بثلاث مرات من عرضه: لذلك فالمدة التي قد تستغرقها نقطة ماء للوصول الى نقطة التجمع تقارب 5 ساعات مما يفسر لنا ان احتمالية وشدة حدوث فيضان في المنطقة وارده.

كل هذه النتائج المحصلة تقدم لنا عدة اقتراحات ممكنة للإحداث مشاريع تكون مساهمة للظروف والاحوال التي تعرفها منطقة املن.

## Liste des figures :

Figure 1 : Bloc-diagramme montrant la forme générale d'un bassin versant.....	10
Figure 2 : Situation géographique du bassin versant d'Amlen.....	11
Figure 3:Diagrammes des précipitations et températures de la région d'Amlen de l'année 2020.....	12
Figure 4 : Carte géologique de Tafraout – Amlen non complet.....	13
Figure 5 : La télédétection pour une observation globale de l'environnement. ....	17
Figure 6 : Schéma d'acquisition d'une image satellite « optique ».....	18
Figure 7: Schéma générale d'un capteur. ....	21
Figure 8 : Exemple de MNT de la zone de bassin Amlen. ....	24
Figure 9 : Schéma qui illustre l'opération de soustraction de deux images satellites.....	32
Figure 10 : Différentes étapes de la détection du changement du couvert terrestre.....	33
Figure 11 : Carte montrant de la forme du bassin versant Amlen.....	34
Figure 12 : Paramètres géométriques du bassin versant d'Amlen. ....	34
Figure 13 : L'indice de compacité de Gravelius, 1914, KG (ou KC). ....	35
Figure 14 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Amlen.....	37
Figure 15 : Carte hypsométrique du bassin versant d'Amlen. ....	38
Figure 16 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'Amlen. ....	39
Figure 17 : Carte de pente du bassin versant d'Oued d'Amlen.....	40
Figure 18 : Carte de réseau hydrographique.....	42
Figure 19 : Carte de précipitation moyenne du mois 2 et 8 2022 de bassin d'Amlen. ....	47
Figure 20 : Diagramme représentant la somme des précipitations annulées depuis 1999 jusqu'à 2022.....	47
Figure 21 : Carte de faille du bassin d'Amlen.....	48
Figure 22 : Rosace montre la direction de contraint principal. ....	49
Figure 23:Carte géologique de Tafraout – Amlen issue de la classification supervisée. .	50
Figure 24: Les cartes NDVI du Bassin versant d'Amlen.....	52
Figure 25 : Diagramme représentant l'évolution du couvert végétale pendant les années 1999, 2022 et 2023.....	53
Figure 26 : Les incendies qui ont affecté le couvert végétal d'Amlen.....	54
Figure 27 : les différents types de végétation d'Amlen.....	55
Figure 28 : Carte NDWI du bassin versant d'Amlen. ....	56
Figure 29 : Carte NDSI du bassin versant d'Amlen. ....	57

## Liste des tableaux :

<b>Tableau 1:Domaine d'application de la Télédétection.....</b>	<b>19</b>
<b>Tableau 2: Les caractéristiques de LANDSAT 4-5.....</b>	<b>25</b>
<b>Tableau 3 : Les caractéristiques de LANDSAT 8. ....</b>	<b>26</b>
<b>Tableau 4 : Paramètres du rectangle équivalent du bassin versant Amlen.....</b>	<b>37</b>
<b>Tableau 5 : Répartition des paramètres géométriques en fonction des tranches d'altitudes.....</b>	<b>37</b>
<b>Tableau 6 : Répartition des tranches d'altitudes du bassin versant d'Amlen.....</b>	<b>39</b>
<b>Tableau 7 : Récapitulation des caractéristiques topographiques du BV d'Amlen. ....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau 8 : Méthodes de calculs les caractéristiques topographiques du bassin versant. .....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau 9 : Les formules de calcul du temps de concentration. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tableau 10 : Récapitulation du calcul de temps de concentration. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tableau 11 : Les valeurs retenues du temps de concentration. ....</b>	<b>45</b>
<b>Tableau 12 : Les différents types de végétation et leurs NDVI dans l'été et l'hiver. ....</b>	<b>55</b>

# 1 INTRODUCTION :

L'étude d'un bassin versant vise à comprendre les processus hydrologiques qui transforment la pluie en débit, ainsi que les interactions entre l'eau, le sol, la végétation et les activités humaines. L'aménagement d'un bassin versant consiste à mettre en œuvre des mesures pour préserver ou restaurer les fonctions écologiques et socio-économiques de l'eau et des écosystèmes associés. Notre étude porte sur la région de Tafraout, au sud du Maroc, renommée pour son riche patrimoine culturel et ses paysages montagneux pittoresques. L'objectif principal de cette étude est d'estimer l'intensité des crues et de détecter les changements du couvert végétal en utilisant la télédétection et le système d'information géographique (SIG). Ensuite, la validation et la vérification des résultats obtenus via des sorties de terrain pour comparer les données numériques aux données réelles afin de les rendre plus fiables.

Les résultats de cette recherche fournissent des informations précieuses pour la gestion des risques liés aux crues dans la région d'Amlen. Les autorités locales et les gestionnaires des risques peuvent utiliser ces informations pour prendre des décisions éclairées et mettre en place des mesures de prévention et de gestion appropriées.

La première partie de l'étude est réservée à la détermination des caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin versant, telles que sa forme, sa pente et son relief. La forme du bassin versant décrit sa configuration géométrique générale, qui peut influencer l'écoulement de l'eau. La pente du terrain dans le bassin versant détermine la vitesse d'écoulement des eaux de surface et peut affecter le risque de crues et d'érosion. Le relief influence la direction de l'écoulement de l'eau et la formation des cours d'eau. L'étude de ces caractéristiques permet de mieux comprendre la dynamique hydrologique du bassin versant, essentielle pour la gestion des ressources en eau et l'évaluation des risques associés.

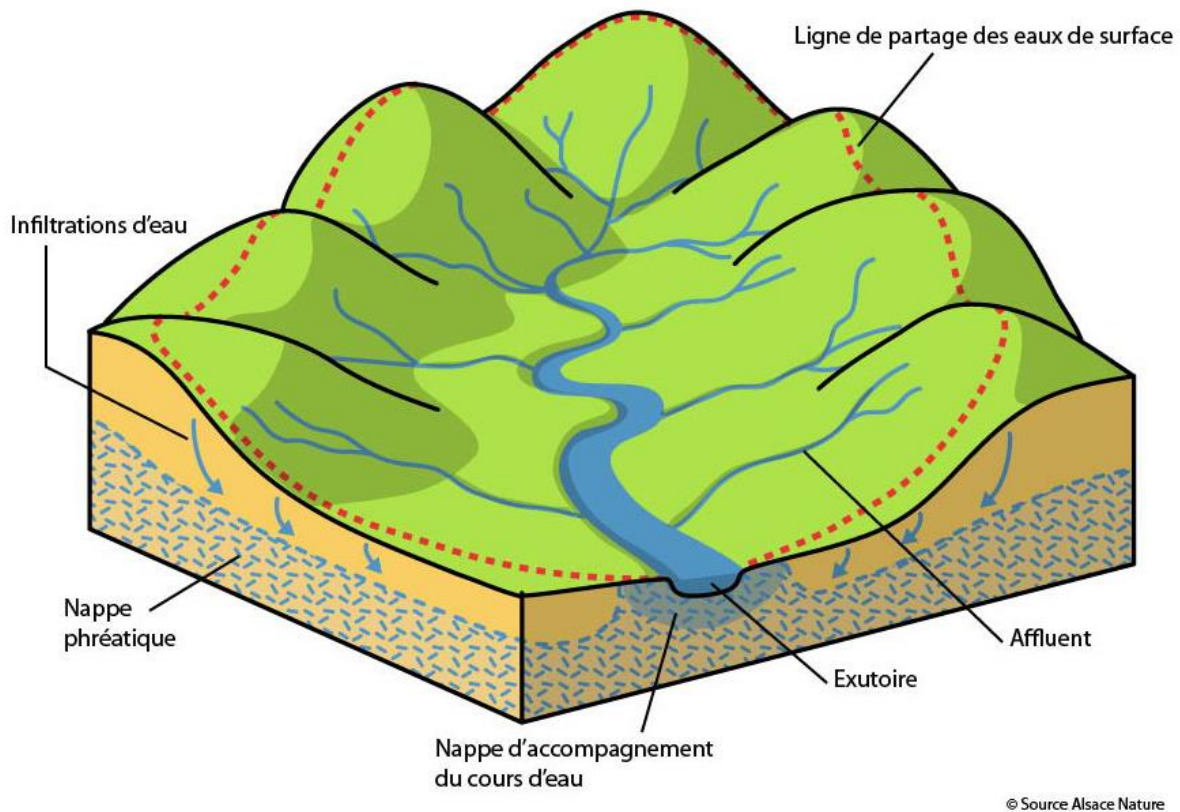
La deuxième partie comprend l'analyse des caractéristiques hydrologiques du bassin versant à savoir la classification du réseau hydrographique qui permet de comprendre la connectivité du système de drainage, le temps de concentration qui reflète la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau atteigne le cours d'eau principal, la densité de drainage qui indique la concentration des cours d'eau dans le bassin versant, la pluviométrie et la carte de précipitation fournissent des informations sur les schémas de précipitations et les zones de recharge de la nappe où les eaux de surface s'infiltrent dans les aquifères souterrains.



La troisième partie est consacrée à l'étude de la végétation et de l'occupation du sol dans le bassin versant en utilisant l'indice de végétation (NDVI), les indices d'eau et du sol (NDWI et NDSI), ainsi que la carte d'occupation des sols. Ces outils permettent de cartographier la végétation, d'évaluer l'humidité du sol et la présence d'eau, ainsi que de caractériser les types d'utilisation des terres. Ces informations sont cruciales pour la planification environnementale et le suivi des changements dans le bassin versant.

## 2 PRESENTATION GENERALE DE BASSIN VERSANT DE VALLE D'AMLEN.

### 2.1 Définition de bassin versant :



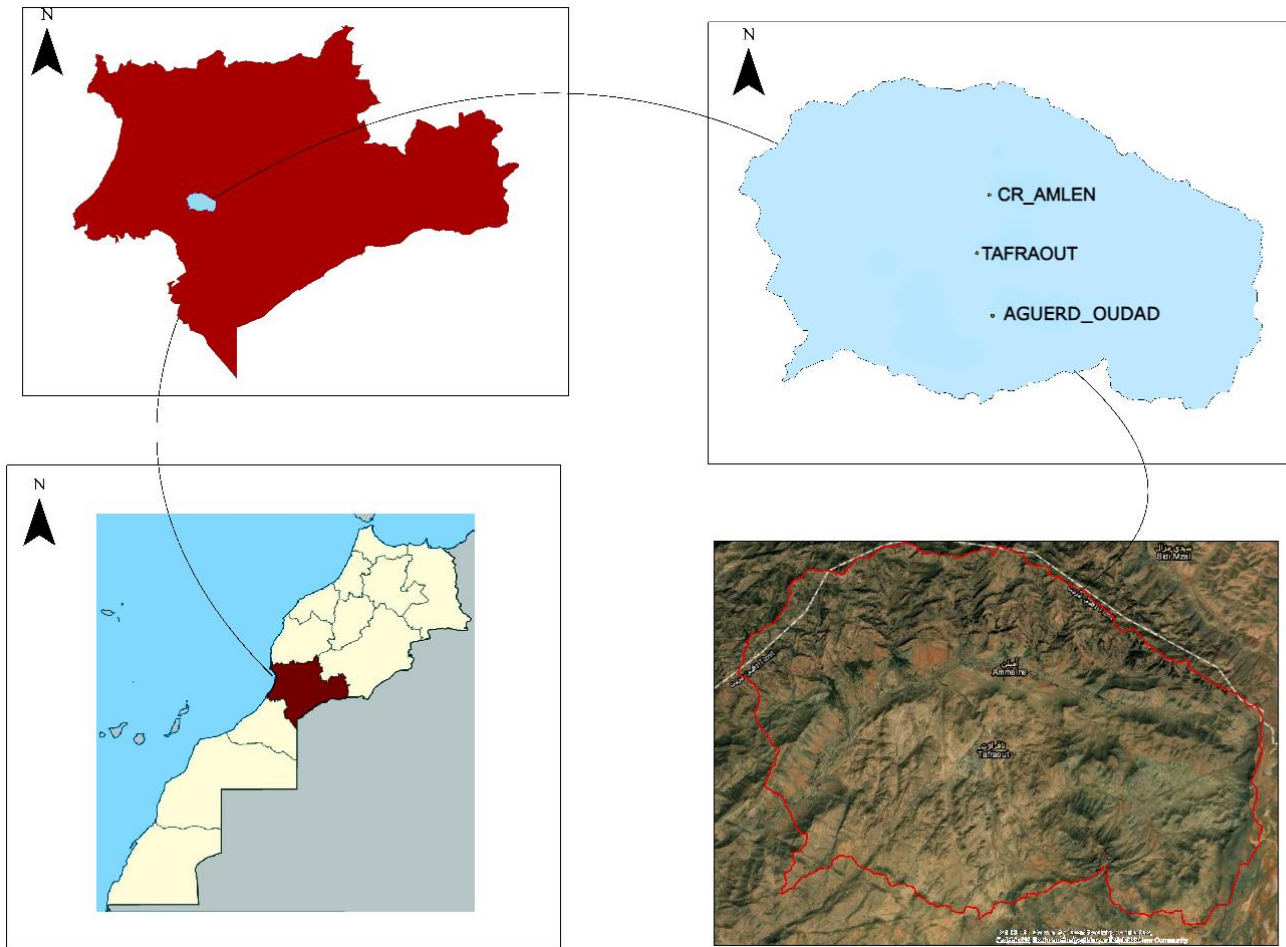
***Figure 1 : Bloc-diagramme montrant la forme générale d'un bassin versant.***

Un bassin versant est une région géographique délimitée par des crêtes de montagnes ou des lignes de partage des eaux. Il regroupe l'ensemble des terrains sur lesquels les eaux de pluie ou de fonte des neiges s'écoulent vers un point commun, comme une rivière, un fleuve ou un lac. Les précipitations qui tombent à l'intérieur du bassin versant s'écoulent vers les parties les plus basses, formant des ruisseaux et des rivières qui se rejoignent pour former le cours d'eau principal. (Figure 1)

La gestion des bassins versants est essentielle car toutes les activités humaines et les impacts environnementaux dans cette région peuvent affecter la qualité et la quantité de l'eau disponible. Il est donc important de préserver et de gérer durablement les bassins versants afin de protéger les ressources en eau et de maintenir l'équilibre des écosystèmes aquatiques.

## 2.2 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE :

La vallée des Amlen traverse la petite ville de Tafraout, situé dans une altitude de 1000 m de niveau de la mer, entourée de hautes montagnes qui culminent à 2500 d'altitude, en plaine chaîne de l'Anti\_Atlas. La vallée d'Amlen est au cœur de l'Anti-Atlas occidental. Elle se présente sous forme d'un long sillon de verdure qui s'étend aux pieds de Jbel El Kest (Figure 2).



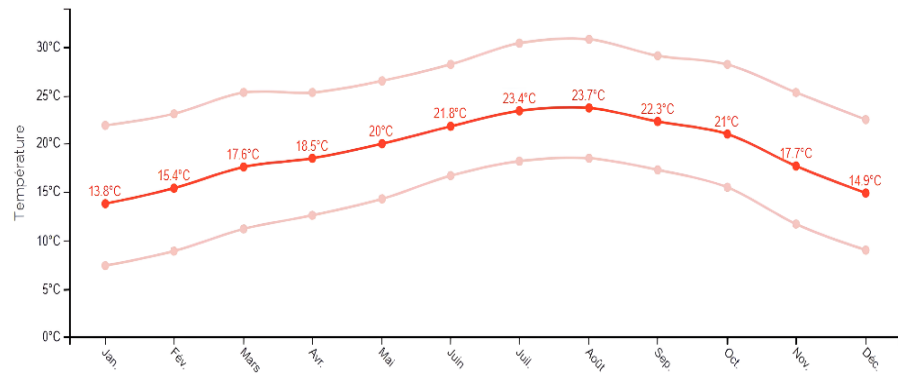
***Figure 2 : Situation géographique du bassin versant d'Amlen.***

Ce bassin en question couvre une superficie de 288,10 km<sup>2</sup> avec une longueur de 31,45 km et une largeur de 9,15 km. Il est situé entre les latitudes 29,3436°N et 30,0592°N, ainsi que les longitudes 9,4034°W et 8,4471°W. Ces caractéristiques géographiques définissent la taille, la forme et la position du bassin sur la surface de la Terre, en fournissant des indications sur la zone qu'il englobe et sa localisation précise.

## 2.3 CONTEXTE CLIMATIQUE :

Tafraout présente un climat semi-aride comme climat dominant. Sur la période de 1999 à 2022, la température moyenne dans cette région s'élève à environ 17,13 °C. Le mois le plus chaud enregistré est juillet de l'année 2022, avec une température moyenne d'environ 33,67 °C. En revanche, le mois de janvier de l'année 2006 détient le record de la température la plus froide, atteignant près de -0,02 °C.

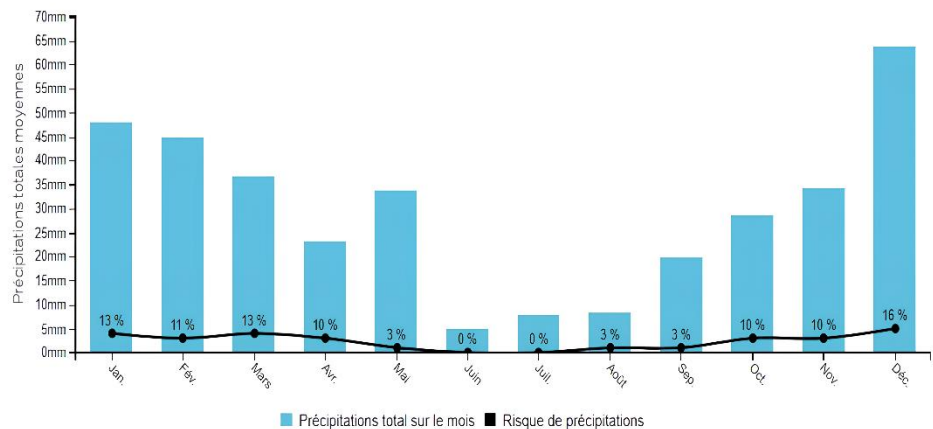
TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES



([https://planificateur.a-contresens.net/afrique/maroc/ma\\_09/tafraout/2531877.html](https://planificateur.a-contresens.net/afrique/maroc/ma_09/tafraout/2531877.html).)

Au cours de la période de 1999 à 2022, la moyenne annuelle des précipitations à Tafraout s'élève à 221,63 mm. Les mois d'été se caractérisent par une faible moyenne de précipitations, avoisinant les 1 mm, tandis que les mois d'hiver enregistrent une moyenne plus élevée d'environ 56,67 mm.

PRÉCIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES



([https://planificateur.a-contresens.net/afrique/maroc/ma\\_09/tafraout/2531877.html](https://planificateur.a-contresens.net/afrique/maroc/ma_09/tafraout/2531877.html).)

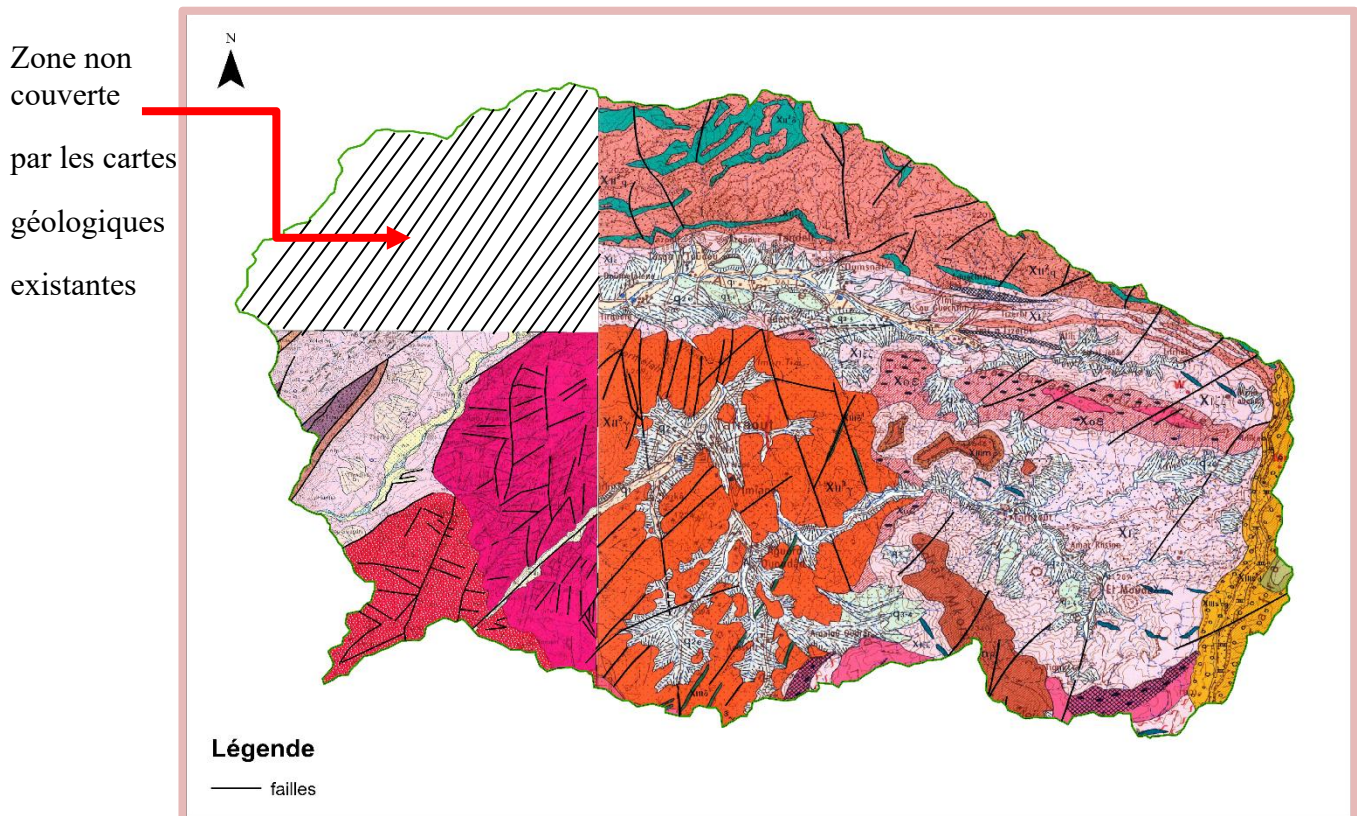
**Figure 3: Diagrammes des précipitations et températures de la région d'Amlen de l'année 2020.**

Pendant la période estivale, en juillet, le taux d'humidité relative le plus bas est de 24,30 %. En revanche, pendant la saison hivernale, en décembre, le taux d'humidité relative atteint son maximum à 54,40 %. Les quantités les plus faibles de pluies est enregistrée p, tandis que les jours les plus pluvieux sont mesurés pendant l'hiver, avec une moyenne de 3 jours de précipitations.



## 2.4 CONTEXTE GEOLOGIQUE :

La vallée des Amlen fait partie de la boutonnière du Kerdous, qui est l'une des plus grandes structures tectoniques de l'Anti-Atlas. Les formations géologiques de Taфраout sont principalement constituées de roches métamorphiques et granitiques du Protérozoïque supérieur, formant ainsi le socle de l'Anti-Atlas (Figure 3). Ces roches ont subi plusieurs phases de déformation et de magmatisme liées au cycle panafricain, qui s'est déroulé il y a environ 800 à 500 millions d'années.



D'après les deux cartes géologiques TAFRAOUT 1/100000 et HAD N TAHALA 1/50000 (modifié).

***Figure 4 : Carte géologique de Taфраout – Amlen non complet.***

## 2.5 CONTEXTE HYDROLOGIQUE :

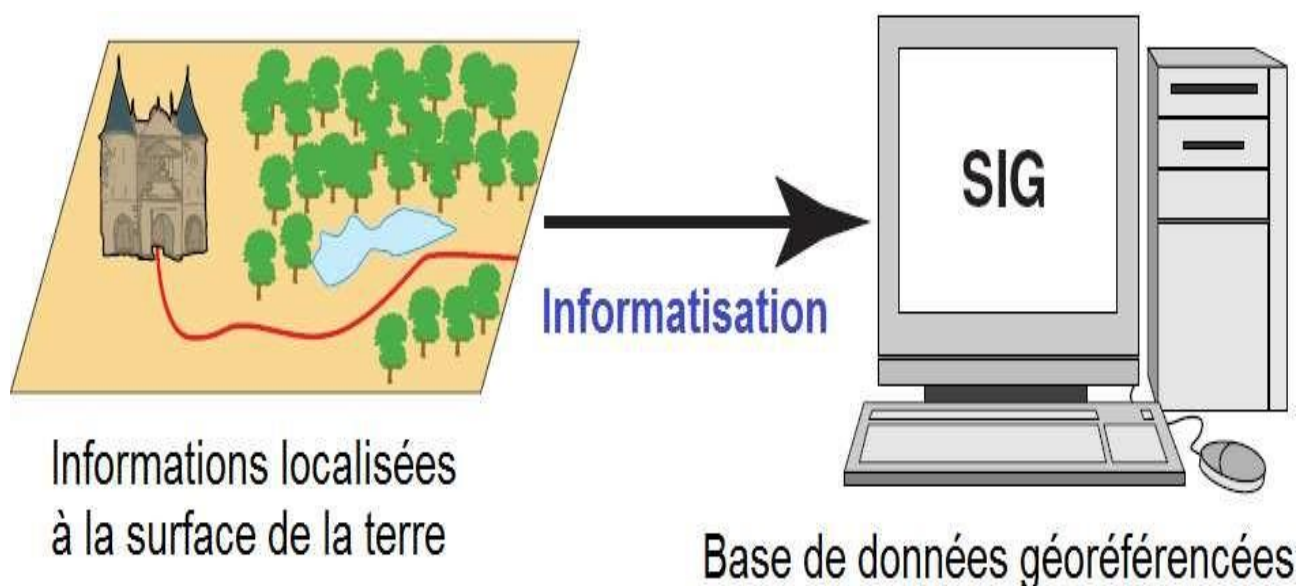
Vallée Amlen est alimentée par les eaux de ruissèlement et les sources qui émergent des roches granitiques et métamorphiques du massif de Kerdous. En général, les granites sont peu perméables, sauf s'ils sont fortement fracturés. Les roches métamorphiques peuvent présenter une perméabilité variable en fonction de leur degré de métamorphisme et de leur minéralogie. Les roches volcaniques peuvent présenter des zones perméables liées aux fissures ou aux vides laissés par les gaz. La perméabilité des formations géologiques influence l'hydrologie du bassin d'Amlen, en particulier la recharge des nappes souterraines et l'écoulement des eaux de surface.

### 3 MATERIEL ET METHODES

#### 3.1 SIG et cartographie numérique

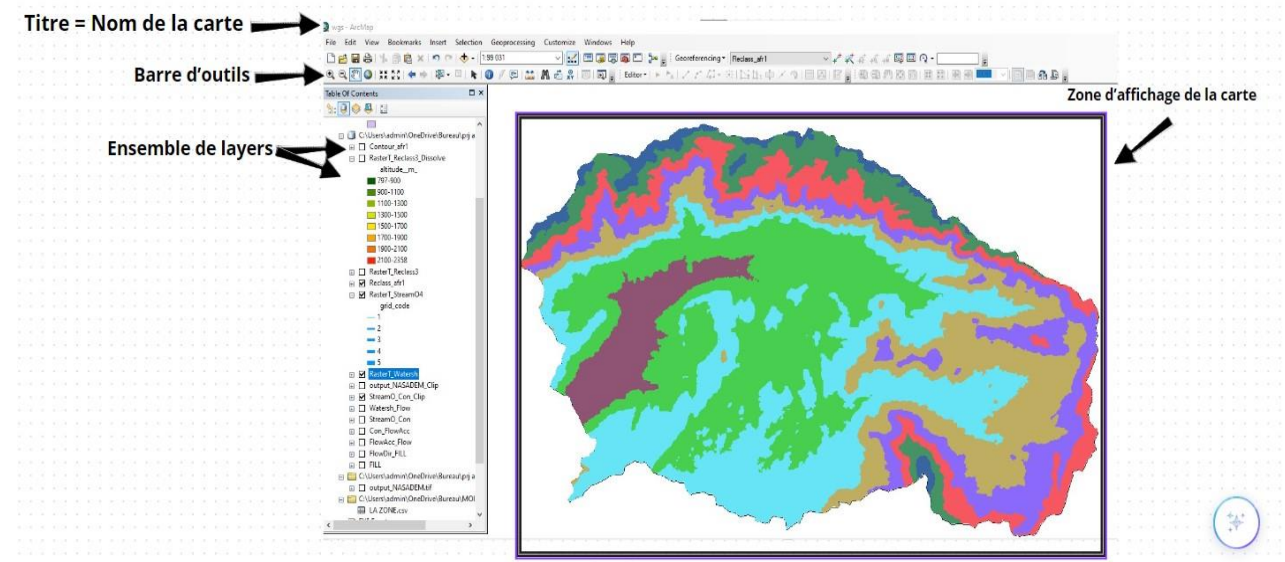
Le système d'information géographique (SIG) a été utilisé à différents stades pour améliorer les fonctions du traitement d'images par télédétection. Il offre également un environnement flexible permettant de capturer, analyser, gérer et afficher des données numériques provenant de diverses sources nécessaires aux applications de télédétection. De nombreux projets de télédétection doivent créer une base de données SIG pour stocker, organiser et visualiser des photographies aériennes et terrestres, des images satellites ainsi que des données auxiliaires, de référence et de terrain.

Le SIG est un logiciel informatique spécialement conçu pour travailler avec des données géographiques. Il effectue une gamme complète de tâches de traitement des données, telles que l'entrée, le stockage, l'extraction et la sortie, en plus d'une variété de fonctions descriptives et analytiques. La fonction analytique fondamentale du SIG consiste à superposer des couches de données avec référence spatiale. Chaque couche décrit une caractéristique géographique spécifique dans une zone géographique délimitée, comme le sol, l'altitude, l'utilisation des terres, la végétation, le réseau de transport, les cours d'eau, etc. La superposition des couches de données dans le SIG permet de définir les relations spatiales entre ces différentes couches.



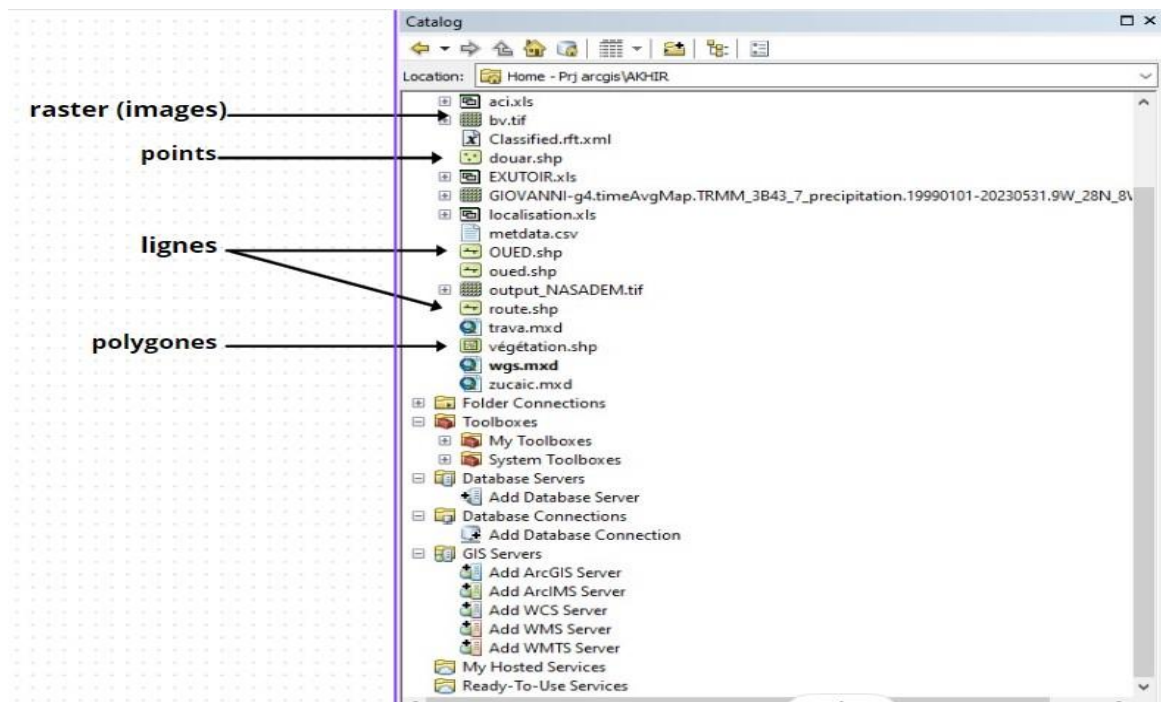
### 3.1.1 ArcMap :

ArcMap est l'un des applications qui permet la création et la visualisation de cartes. Elle offre une interface conviviale pour la conception de cartes, l'affichage de données géographiques, l'étiquetage, la symbolisation et l'analyse spatiale. Cette application permet aussi la création des cartes thématiques, des cartes de base, des cartes en 3D et des cartes interactives.



### 3.1.2 ArcCatalog :

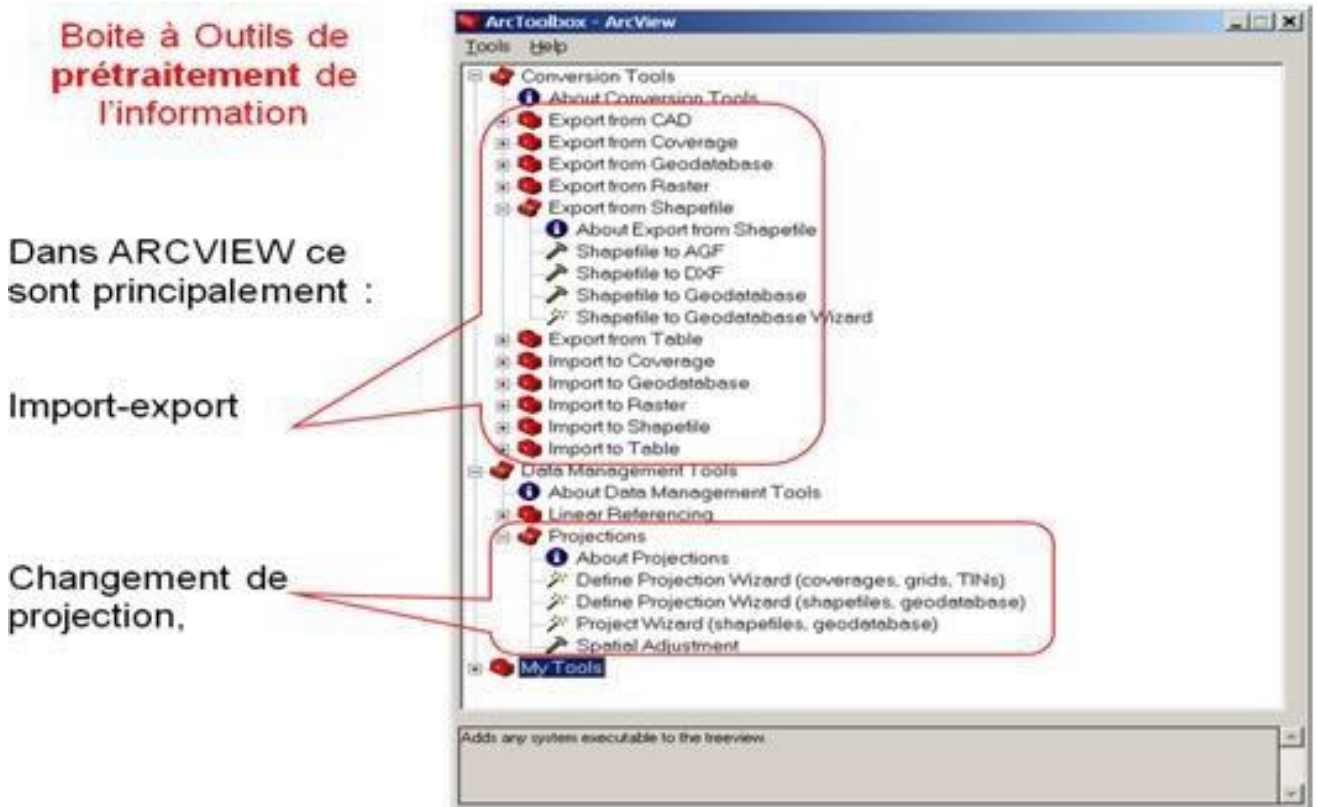
ArcMap est une application de gestion des données géographiques. Elle permet d'organiser, de rechercher et de gérer des jeux de données spatiales. ArcCatalog permet aussi de créer des géodatabases, des dossiers de travail, des connexions aux bases de données, et pour gérer les métadonnées associées à vos données géographiques.





### 3.1.3 ArcToolbox :

Est une application qui regroupe un ensemble d'outils de géotraitement. Le géotraitement est le processus d'analyse spatiale et de manipulation de données géographiques. ArcToolbox fournit des outils pour effectuer des opérations de géotraitement telles que la transformation de coordonnées, la création de tampons, l'intersection de couches, l'analyse de réseaux, la modélisation et bien plus encore.



En combinant ces trois applications, les utilisateurs d'ArcGIS Desktop peuvent réaliser des tâches SIG complètes. Ils peuvent créer, gérer, analyser et mettre à jour des données géographiques, ainsi que générer des cartes de qualité professionnelle pour la visualisation et la communication des résultats. ArcGIS Desktop est largement utilisé dans de nombreux domaines, tels que la gestion de l'environnement, l'aménagement du territoire, la gestion des ressources, l'analyse de marché et bien d'autres encore.

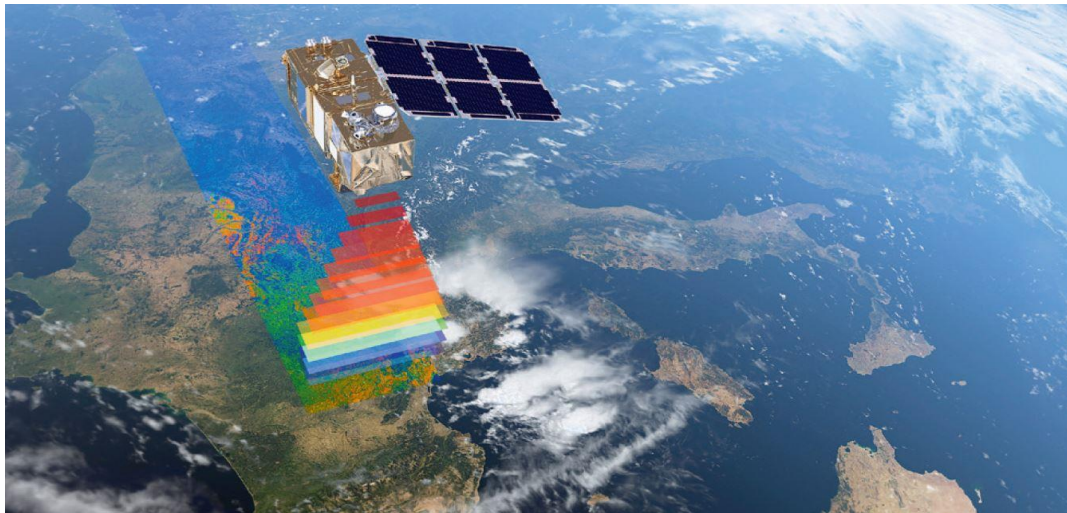


## 3.2 Principe de la télédétection et notion de réflectance

### 3.2.1 Principe et domaine d'application :

#### 3.2.1.1 La télédétection :

Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. » (Figure 4)



**Figure 5 : La télédétection pour une observation globale de l'environnement.**

*([https://www.reussir.fr/lait/la-teledetection-pour-piloter-le-paturage.](https://www.reussir.fr/lait/la-teledetection-pour-piloter-le-paturage))*

En bref La télédétection est définie comme l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information. (Kergomard)

Le principe de la télédétection est basé sur l'acquisition d'informations sur un objet, une zone ou un phénomène sans être en contact direct avec eux. Cela se fait généralement à partir de capteurs ou d'instruments situés sur des plateformes telles que des satellites, des avions ou des drones.

La télédétection utilise différentes parties du spectre électromagnétique, notamment les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible et les rayons X, pour collecter des données sur la surface terrestre, l'atmosphère ou d'autres objets. Les capteurs enregistrent l'énergie électromagnétique réfléchie ou émise par la cible d'intérêt.

Les principaux composants de la télédétection sont les suivants (Figure 5) :

✓ **Source d'énergie :**

Il peut s'agir du soleil, qui émet naturellement de l'énergie électromagnétique, ou d'une source artificielle d'énergie, comme le radar.

✓ **Interaction avec la cible :**

L'énergie électromagnétique émise par la source interagit avec la cible. Une partie de cette énergie est réfléchie, une partie est absorbée et une partie peut traverser la cible. La nature de cette interaction dépend des propriétés de la cible, comme sa composition, sa structure et sa rugosité.

✓ **Capteur :**

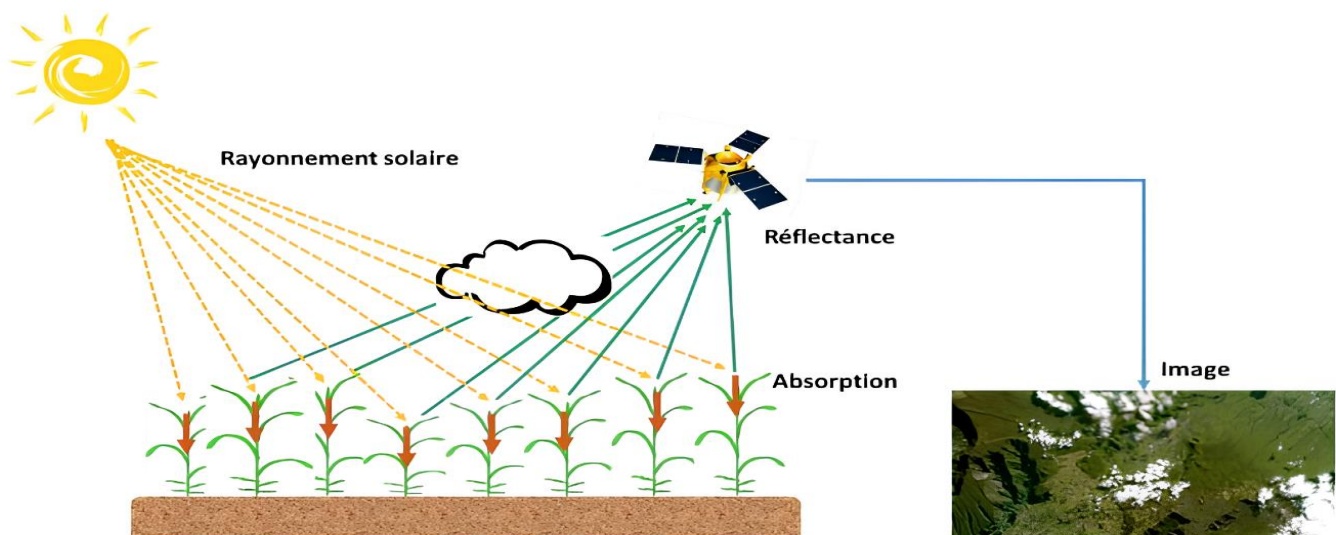
Le capteur enregistre l'énergie électromagnétique qui est renvoyée par la cible. Il peut s'agir d'une caméra, d'un radiomètre, d'un lidar, d'un radar, etc., selon la région du spectre électromagnétique étudiée.

✓ **Enregistrement et transmission des données :**

Les données collectées par le capteur sont enregistrées et transmises à une station de réception au sol, ou directement dans le cas des satellites de télécommunications.

✓ **Traitement et analyse des données :**

Les données brutes sont traitées et analysées pour en extraire des informations utiles. Cela peut impliquer des techniques telles que la classification d'image, la modélisation 3D, l'interprétation visuelle, etc.



**Figure 6 : Schéma d'acquisition d'une image satellite « optique ».**

### 3.2.1.2 Domaines d'applications :

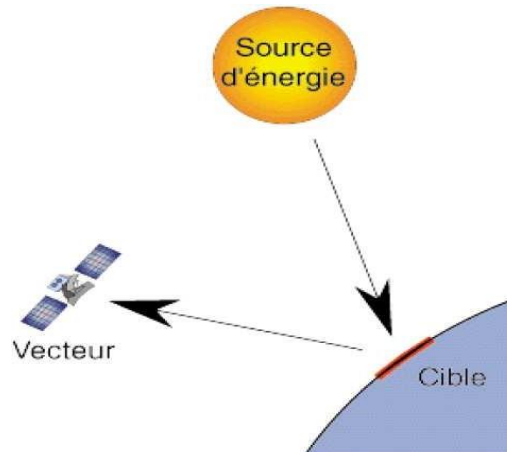
La télédétection est utilisée dans de nombreux domaines, tels que l'observation de la Terre, la cartographie, l'agriculture, la gestion des ressources naturelles, la surveillance environnementale, la météorologie, la gestion des catastrophes, la planification urbaine, etc. Elle permet d'obtenir des informations sur de vastes zones géographiques, d'effectuer un suivi à long terme et de détecter des changements qui seraient difficiles à observer (tableau 1).

**Tableau 1: Domaine d'application de la Télédétection.**

Vecteur	Capteur	Domaine d'application
<b>TELEDETECTION DE L'ATMOSPHERE (Météorologie, Climatologie) :</b>		
Satellites géostationnaires (Météosat). Satellites à défilement (NOAA).	Basse et moyenne résolution (on privilégie la répétitivité et la couverture spatiale). Capteurs passifs : visible, infrarouge, microondes. Sondeurs atmosphériques. Dans le futur : radars pluviométriques, Lidars (capteurs à laser).	Etude de la nébulosité mesure de température vapeur d'eau et précipitations éléments du bilan radiatif
<b>OCÉANOGRAPHIE ET ETUDES LITTORALES</b>		
Avions. Satellites météorologiques ou de télédétection terrestre, Satellites spécialisés (Nimbus, Seasat, ERS-1).	Toutes résolutions selon les espaces considérés (de l'océanographie côtière à l'océanographie globale). Capteurs passifs : visible, infrarouge, microondes. Radars imageurs, radar-altilimètre, diffusiomètre.	Analyse de la couleur de l'océan (production biologique, turbidité). Mesures des températures de surface de la mer. Vagues et vents. Altitude de la surface (dynamique de l'océan). Glaces de mer.
<b>APPLICATIONS TERRESTRES</b>		
Avions. Satellites à défilement en orbite polaire (Landsat, SPOT).	Surtout haute et très haute résolution spatiale : Photographie aérienne. Capteurs passifs : radiomètres à balayage (domaine optique). Capteurs actifs : radars imageurs.	Cartographie régulière et thématique Géologie, prospection minière, géomorphologie. Hydrologie, neige, risques naturels. Agriculture, sylviculture. Urbanisme. Aménagement, génie Civil.

### 3.2.1.3 La notion de réflectance :

La notion de réflectance fait référence à la mesure de la quantité de lumière réfléchiée par une surface ou un matériau. En télédétection, la réflectance est utilisée pour caractériser les propriétés des objets présents sur la surface terrestre, tels que la végétation, le sol, l'eau, les bâtiments, etc.



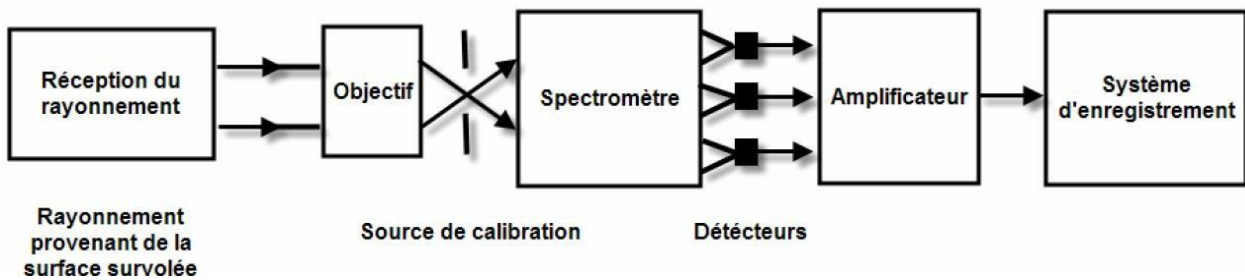
(Assoma)

La réflectance est généralement exprimée sous forme de rapport entre l'énergie lumineuse réfléchiée par une surface et l'énergie lumineuse incidente. Elle peut être mesurée dans différentes bandes du spectre électromagnétique, allant des ondes radio aux rayons X.

La réflectance spectrale se réfère à la variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. Différents objets ont des caractéristiques spectrales uniques, ce qui permet de les distinguer et de les identifier à partir de leurs signatures spectrales.

La réflectance est influencée par divers facteurs, notamment les propriétés intrinsèques des matériaux, comme leur composition chimique, leur structure microscopique et leur rugosité de surface. Les caractéristiques atmosphériques, telles que l'absorption et la diffusion de la lumière, peuvent également avoir un impact sur la réflectance mesurée.

La télédétection utilise des capteurs (Figure 6) embarqués sur des plateformes spatiales, aériennes ou terrestres pour mesurer la réflectance des surfaces. Les données de réflectance sont ensuite analysées et interprétées pour extraire des informations sur l'environnement étudié, telles que la santé des cultures, la qualité de l'eau, la composition du sol, etc.



**Figure 7: Schéma générale d'un capteur.** (Salim)

La réflectance est souvent corrigée pour les effets atmosphériques et d'autres facteurs environnementaux afin d'obtenir des mesures précises et comparables entre différentes acquisitions et zones géographiques.

**Sept étapes couvrent le processus de la**

**TLD au moyen de systèmes imageurs :**

(A) Source d'énergie ;

(B) Rayonnement atmosphère ;

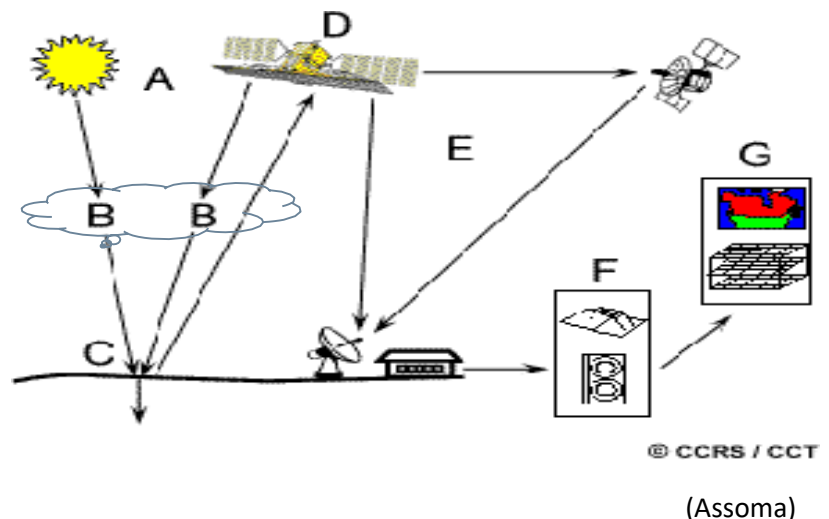
(C) Interaction avec la cible ;

(D) Enregistrement de l'Énergie par le capteur ;

(E) Transmission, réception et traitement ;

(F) Interprétation et analyse ;

(G) Application.



En résumé, la réflectance est une mesure de l'énergie lumineuse réfléchie par une surface et joue un rôle essentiel dans la télédétection pour caractériser les propriétés des objets et des environnements observés.

### 3.3 Présentation des données utilisées

#### 3.3.1 Les données

Les données jouent un rôle essentiel dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Elles se présentent sous trois formes principales : données géographiques, données attributaires et métadonnées.

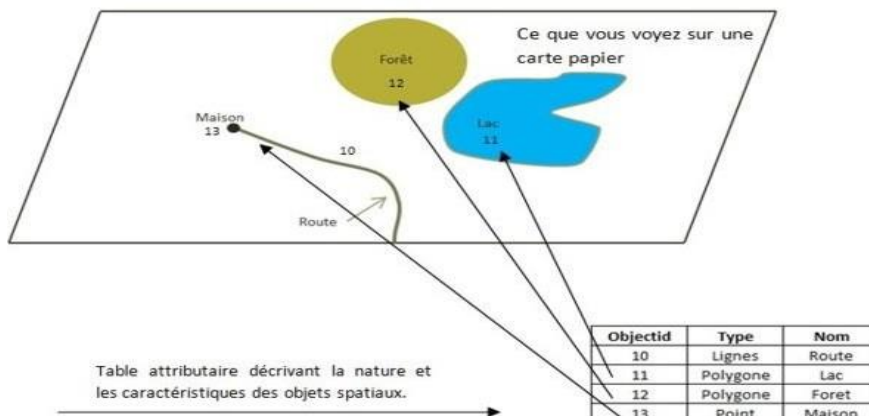
##### 3.3.1.1 Les données géographiques :

Sont des informations spécifiquement liées à des emplacements, et elles comprennent à la fois des éléments visuels et des paramètres d'affichage tels que la couleur ou l'épaisseur du trait. Ces données peuvent être classées en deux types principaux : les données raster et les données vecteur.



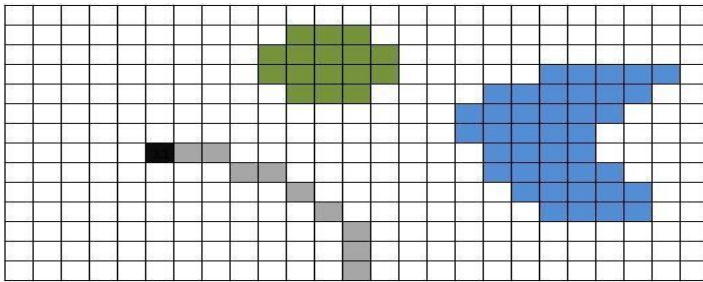
##### 3.3.1.1.1 Les données de type Vecteur :

Sont utilisées pour représenter des objets spatiaux tels que des points, des lignes ou des polygones. Chaque objet spatial est associé à un identifiant unique qui permet de le lier à une table attributaire. Ainsi, les données vectorielles combinent à la fois des informations géométriques et des attributs spécifiques à chaque objet.

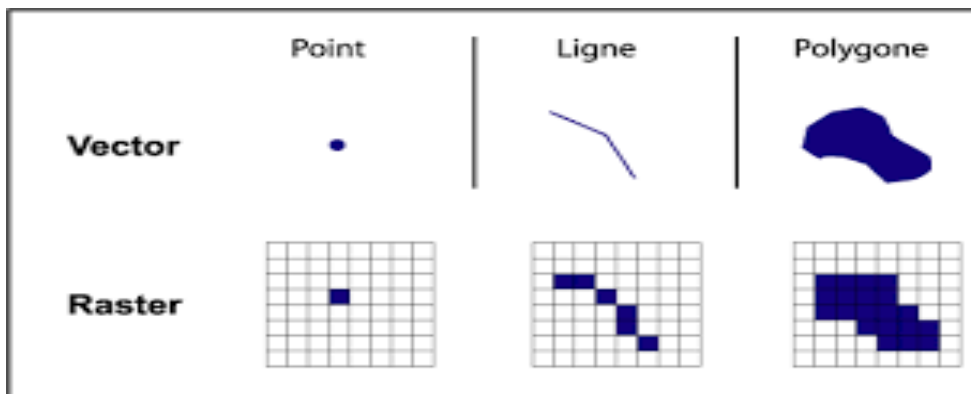


### 3.3.1.1.2 Les données de type Raster :

Les données de type Raster sont représentées sous forme d'images numériques où chaque pixel est associé à une valeur qui le caractérise, que ce soit une couleur ou une mesure spécifique (comme l'altitude, par exemple). Ces données sont organisées en une grille régulière de pixels, formant ainsi une représentation discrète de l'espace.



Différents types de données dans un SIG :



### 3.3.1.2 Les données attributaires :

Caractérisent les données géographiques (nom d'une route, nombre d'habitants dans un immeuble localisé, ...).

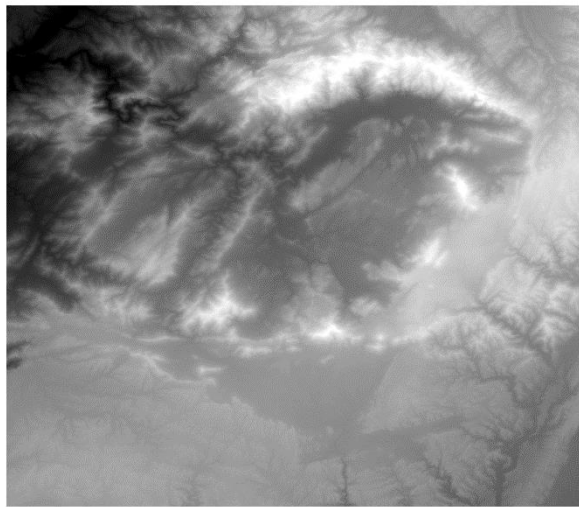
### 3.3.1.3 Les métadonnées :

Décrivent directement la ressource c'est-à-dire ici les données, ce sont « les données sur les données » par exemple la date d'acquisition, le nom du propriétaire, etc.



#### **3.3.1.4 MNT (Modèle Numérique de Terrain) :**

Est une représentation numérique de l'élévation du terrain sur une zone géographique donnée. Il est généralement présenté sous la forme d'une grille régulière de cellules, où chaque cellule contient une valeur d'altitude. Les MNT ou DEM (Figure 7) sont créés à partir de sources de données telles que des levés topographiques, des données LiDAR, des images stéréoscopiques ou d'autres techniques de collecte de données. Le MNT permet d'effectuer des analyses spatiales, de calculer des paramètres topographiques et de générer des modèles 3D du relief. Il est largement utilisé dans les systèmes d'information géographique (SIG) pour la visualisation, l'analyse et la prise de décision en matière d'environnement et de géographie.



***Figure 8 : Exemple de MNT de la zone de bassin Amlen. (<https://opentopography.org/>)***

#### **3.3.1.5 Les images satellitaires :**

Rendues par Landsat 8 offrent une résolution spatiale de 30 mètres, ce qui signifie qu'un pixel sur l'image représente une surface de 30 mètres sur la Terre. Le capteur optique de Landsat 8 enregistre des données dans différentes longueurs d'onde, ce qui permet de distinguer différentes caractéristiques de la surface terrestre, telles que les types de végétation, les plans d'eau, les zones urbaines, etc.



**Tableau 2: Les caractéristiques de LANDSAT 4-5.**

Date de lancement	Landsat 4 : 1982_1993 Landsat 5 :1984_2013
Capteurs	MSS et TM
Altitudes	705 km
Inclinaison	98.2°
Orbite	Polaire, héliosynchrone
Heure de passage à l'équateur	9 :45 (+ /- 15 min)
Période de révolution	99 minutes ; 14, 5 orbites par jour
Couverture répétée	16 jours
Données	Échelle de 12 bits convertis en entiers de 16 bits

Landsat 4 MSS	Bandes spectrales	Longueur d'onde (µm)	Spatial résolution (µm)	Utilisation
Bande 1	Blue	0.45-0.52	30	Cartographie des masses d'eau, des formations rocheuses, des caractéristiques côtières.
Bande 2	Vert	0.52-0.60	30	Cartographie des végétations, des zones forestières, des cultures.
Bande 3	Rouge	0.63-0.69	30	Cartographie des zones urbaines, des sols nus, des changements dans la couverture terrestre.
Bande 4	Proche infrarouge	0.77-0.90	30	Estimation de la biomasse végétale, analyse de la santé des plantes, détection des variations de végétation.
Bande 5	Infrarouge moyen	1.55-1.75	30	Estimation de l'humidité des sols, analyse de la couverture nuageuse.
Bande 6	Thermique infrarouge	10.40-12.50	30	Estimation de la température de surface, détection des feux de forêt, évaluation des échanges de chaleur.
Bande 7	Infrarouge moyen	2.08-2.35	30	Discrimination des types de roches, détection des minéraux hydroxylés, évaluation des sols.

**Tableau 3 : Les caractéristiques de LANDSAT 8.**

Date de lancement	11-févr-13
Capteurs	OLI, TIRS
Altitude	705 km
Inclinaison	98,2°
Orbite	Polaire, héliosynchrone
Heure de passage à l'équateur	Normalement 10h du matin (± 15 min.) heure locale (nœud descendant)
Période de révolution	99 minutes ; ~14,5 orbites par jour
Couverture répétée	16 jours
Données	Échelle de 12 bits convertie en entiers de 16 bits

<b>Landsat 8 OLI</b>	<b>Bandes spectrales</b>	<b>Longueur d'onde (um)</b>	<b>Spatiale résolution(m)</b>	<b>Utilisation</b>
<i>Band 1</i>	Aérosols	0.433 - 0.453	30	<i>Cartographie côtière, classification des terres, observation des océans.</i>
<i>Band 2</i>	Bleu	0.450 - 0.515	30	<i>Suivi de la végétation, analyse de l'usage des terres, études environnementales.</i>
<i>Band 3</i>	Vert	0,525 - 0,600	30	<i>Identification de la végétation, évaluation de la santé des cultures, analyse des feux de forêt.</i>
<i>Band 4</i>	Rouge	0,630 - 0,680	30	<i>Détection de la végétation, caractérisation des sols, cartographie des ressources naturelles.</i>
<i>Band 5</i>	Proche-infrarouge	0,845 - 0,885	30	<i>Détection des feux de forêt, identification des minéraux, évaluation de la qualité de l'eau.</i>
<i>Band 6</i>	Infrarouge à ondes courtes 1	1,560 - 1,660	30	<i>Détection des minéraux, étude des processus géologiques, caractérisation des sols.</i>
<i>Band 7</i>	Infrarouge à ondes courtes 2	2,100 - 2,300	30	<i>Détection des minéraux, étude des propriétés des sols, évaluation de la qualité de l'eau.</i>
<i>Band 8</i>	Panchromatique	0,500 - 0,680	15	<i>Imagerie en haute résolution, cartographie détaillée, observation des détails fins.</i>
<i>Band 9</i>	Cirrus	1,360 - 1,390	30	<i>Détection des nuages fins et des aérosols, correction atmosphérique.</i>

## **3.4 Traitements des données et classification**

### **3.4.1 Traitements :**

Le prétraitement des images satellitaires est une étape cruciale dans l'analyse et l'utilisation des données provenant de capteurs satellitaires. Il comprend plusieurs processus visant à corriger les imperfections et à améliorer la qualité des images avant leur utilisation :

#### **3.4.1.1 Correction géométrique :**

Cette étape vise à corriger les distorsions géométriques présentes dans les images satellitaires. Elle implique généralement la rectification des effets dus à la perspective, à l'inclinaison du capteur, aux erreurs orbitales et aux variations topographiques. L'objectif est de repositionner les pixels de manière précise sur la surface terrestre.

#### **3.4.1.2 Correction radiométrique :**

La correction radiométrique consiste à normaliser les valeurs de luminance des pixels de l'image. Cela permet de compenser les variations dues à l'éclairage solaire, aux conditions atmosphériques, aux caractéristiques du capteur, et à d'autres facteurs. Cette étape vise à obtenir des valeurs radiométriques cohérentes et comparables entre différentes images.

#### **3.4.1.3 Correction atmosphérique :**

Les particules atmosphériques, comme les aérosols, peuvent causer des distorsions dans les images satellitaires. La correction atmosphérique est réalisée pour éliminer ou réduire ces effets et obtenir des données plus précises. Elle implique généralement l'utilisation de modèles atmosphériques et de paramètres pour estimer et compenser l'interaction entre la lumière et l'atmosphère.

#### **3.4.1.4 Masquage des nuages et des ombres :**

Les nuages et les ombres peuvent obstruer la vue de la surface terrestre et affecter l'analyse des images. Le masquage des nuages et des ombres consiste à identifier et à masquer les pixels correspondants, soit en utilisant des algorithmes automatiques basés sur les caractéristiques spectrales, soit en effectuant une interprétation visuelle.

#### **3.4.1.5 Mosaïquage :**

Dans certains cas, il peut être nécessaire de combiner plusieurs images pour couvrir une région d'intérêt plus grande. Le mosaïquage consiste à assembler de manière transparente des images adjacentes afin de créer une image continue sans discontinuités. Cette étape implique une correction géométrique précise pour assurer l'alignement des pixels.

#### **3.4.1.6 Rééchantillonnage :**

Dans certaines analyses, il peut être nécessaire d'ajuster la résolution spatiale des images. Le rééchantillonnage consiste à modifier la taille des pixels en fonction des besoins spécifiques de l'application. Cela peut impliquer une interpolation pour augmenter ou réduire la résolution spatiale.

#### **3.4.2 La classification des images :**

La classification des images satellitaires est un processus qui consiste à attribuer des étiquettes ou des classes à des pixels ou à des objets présents dans une image satellitaire en fonction de leurs caractéristiques spectrales. Cela permet de regrouper les pixels en différentes classes représentant des caractéristiques spécifiques de la surface terrestre, telles que les types de végétation, les zones urbaines, les plans d'eau, etc.

##### **3.4.2.1 Classification supervisée :**

Dans la classification supervisée, des échantillons d'entraînement préalablement étiquetés sont utilisés pour entraîner un algorithme de classification. Ces échantillons représentent différentes classes d'intérêt dans l'image (par exemple, végétation, eau, urbain). L'algorithme apprend à partir de ces échantillons et à partir des caractéristiques extraites des pixels de l'image pour attribuer des classes à l'ensemble de l'image. Certains des algorithmes de classification supervisée couramment utilisés sont les machines à vecteurs de support (SVM), les arbres de décision, les réseaux de neurones, etc.

##### **3.4.2.2 Classification non supervisée :**

Dans la classification non supervisée, aucun échantillon d'entraînement préalablement étiqueté n'est utilisé. Au lieu de cela, l'algorithme de classification analyse les caractéristiques spectrales des pixels de l'image et identifie automatiquement des groupes ou des clusters de pixels similaires. Ces clusters peuvent ensuite être interprétés comme des classes différentes. Les algorithmes de classification non supervisée couramment utilisés incluent la classification par regroupement (comme le k-means, le clustering hiérarchique) et la classification par mélange de modèles (comme la classification par mélange gaussien).

### **3.4.3 Les indices spectraux (NDVI, NDWI et NDSI).**

Les indices spectraux sont des mesures dérivées des valeurs de réflectance dans différentes bandes spectrales d'une image satellitaire. Ces indices sont utilisés pour caractériser et analyser les propriétés des surfaces terrestres, telles que la végétation, l'eau, les sols, etc. Ils fournissent des informations complémentaires sur les propriétés biophysiques et chimiques des matériaux présents dans une image.

#### **3.4.3.1 L'indice de végétation :**

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) l'indice de végétation par différence normalisée est calculé à partir des bandes du rouge et du proche-infrarouge. Les valeurs du NDVI varient généralement de -1 à 1. Les valeurs négatives indiquent généralement des zones sans végétation, comme l'eau ou les surfaces minérales, tandis que les valeurs positives indiquent la présence de végétation. Plus la valeur du NDVI est élevée, plus la végétation est dense et vigoureuse.

La formule du NDVI est la suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

Dans cette formule, "NIR" fait référence à la réflectance dans la bande proche-infrarouge (bande 5) de Landsat 8, et "Red" fait référence à la réflectance dans la bande rouge (bande 4).

#### **3.4.3.2 L'indice d'eau :**

NDWI (Normalized Difference Water Index) : L'indice de différence normalisée de l'eau est utilisé pour détecter les zones d'eau dans une image. Le principe de base de l'indice NDWI repose sur le fait que l'eau absorbe fortement la lumière dans la région de l'infrarouge proche, tandis qu'elle réfléchit la lumière dans la région du vert. En soustrayant la valeur de réflectance de la bande sensible à l'infrarouge proche de celle de la bande sensible au vert, puis en divisant le résultat par la somme de ces deux valeurs, on obtient un indice qui met en évidence les zones contenant de l'eau. Il est calculé à partir des bandes du vert (Bande 3) et du proche-infrarouge (Bande 5).

La formule du NDWI est la suivante :

$$\text{NDWI} = (\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR}).$$

### 3.4.3.3 L'indice du sol :

NDSI (Normalized Difference Soil Index) : l'indice de différence normalisée du sol est utilisé pour caractériser la présence de sol ou de surfaces non végétalisées. L'indice NDSI est calculé en utilisant les réflectances de deux bandes spectrales spécifiques, la bande du proche-infrarouge moyen MIR : Bande 6 et la bande du SWIR1 (infrarouge à ondes courtes 1) : Bande 5.

La formule de calcul de l'indice NDSI est la suivante :

$$\text{NDSI} = (\text{MIR} - \text{SWIR1}) / (\text{MIR} + \text{SWIR1})$$

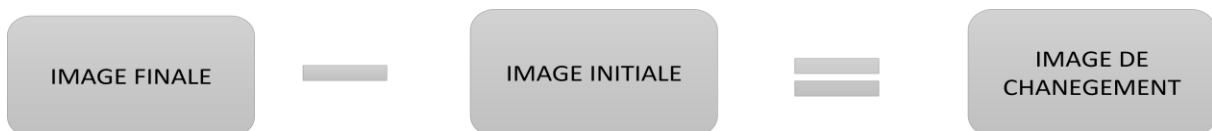
Une valeur élevée de NDSI indique la présence de sol ou de surfaces non végétalisées, tandis qu'une valeur faible ou négative indique la présence de végétation.

### 3.5 Détection des changements :

La détection de changement est une méthode utilisée pour repérer, mettre en évidence, quantifier et comprendre l'évolution temporelle d'un objet ou d'un phénomène à partir d'une série d'observations à différents moments. Dans le domaine de la télédétection, les observations sont effectuées à l'aide de capteurs embarqués sur des satellites ou des avions, fournissant des images multidates de la surface terrestre pour étudier des phénomènes dynamiques spécifiques. Les méthodes de détection de changement sont utilisées dans une grande variété d'applications, avec des objets d'étude, des échelles spatiales et temporelles diverses.

La détection des changements par télédétection repose sur différentes techniques telles que la comparaison d'images, la classification supervisée et l'analyse de séries temporelles. Elle permet de détecter des changements dans des aspects tels que l'occupation des sols, la végétation, les cours d'eau, etc. Les résolutions spatiale et temporelle des images jouent un rôle crucial dans cette méthode. Elle trouve des applications dans la gestion des ressources naturelles, l'aménagement du territoire, la surveillance environnementale, etc. Cependant, elle présente des limites et des défis, notamment la distinction des changements réels des variations saisonnières et la nécessité de disposer de données de référence fiables.

Dans cette étude, nous avons utilisé deux techniques pour évaluer les changements dans la couverture végétale et les surfaces d'eau dans la zone étudiée. La première technique consiste à soustraire pixel par pixel l'image initiale de l'image ultérieure, puis à déterminer des classes de comparaison en fonction du degré de changement entre les deux images (Figure 8).



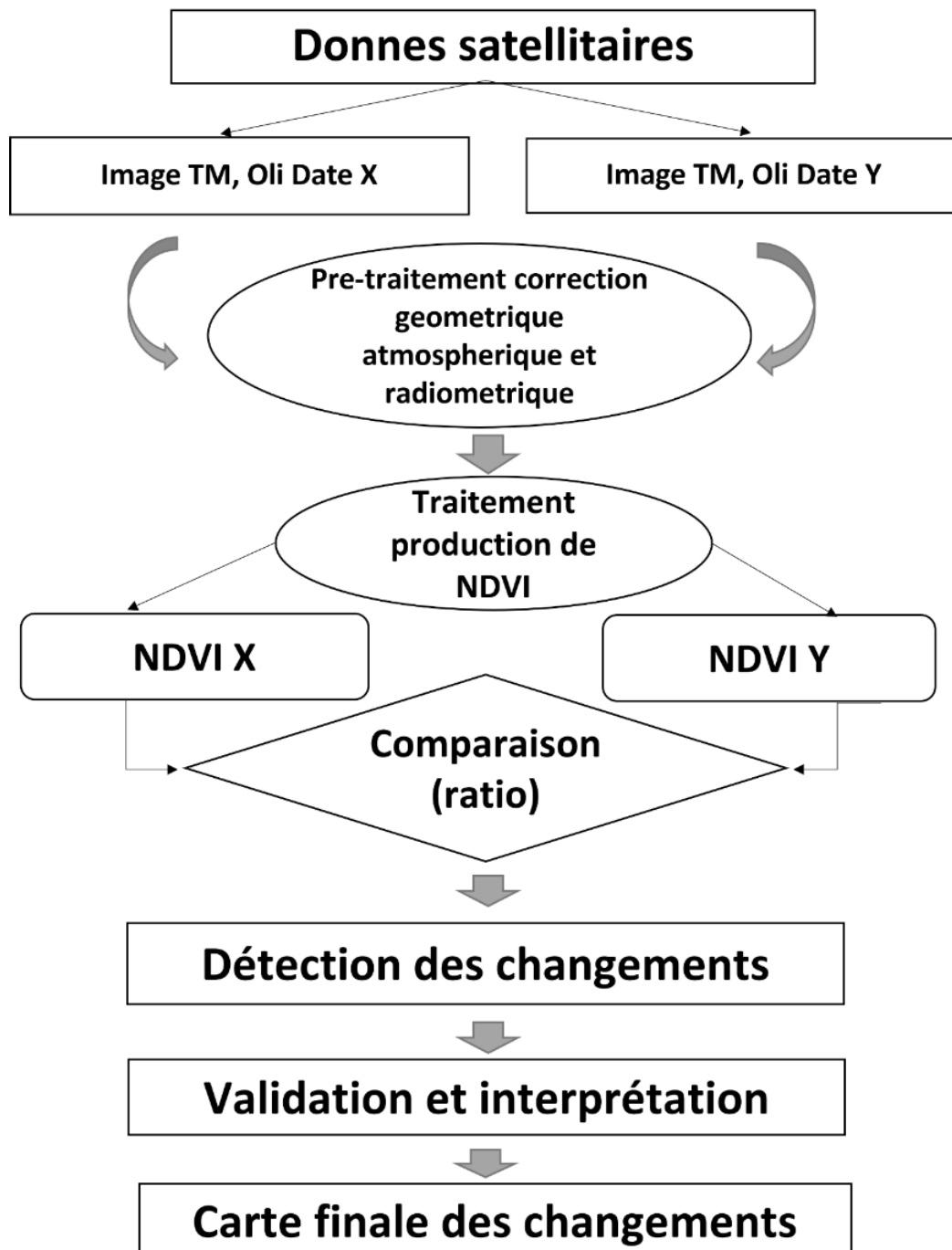
**Figure 9 : Schéma qui illustre l'opération de soustraction de deux images satellites.**

La deuxième technique utilisée dans cette étude consiste à calculer le rapport entre deux images prises à des dates différentes (Figure 9). Ce rapport permet de générer une image représentant les changements qui ont eu lieu dans la zone d'étude. Les valeurs de l'histogramme de cette image sont ensuite regroupées en trois classes correspondant aux types de changement observés : les valeurs inférieures à 0 indiquent une diminution de la radiométrie, les valeurs égales à 0 indiquent l'absence de changement, tandis que les valeurs supérieures à 0 indiquent une augmentation de la radiométrie. L'analyse des résultats a permis d'établir une corrélation entre l'état de la végétation, des surfaces d'eau et le type de changement détecté. Une régression



de la radiométrie est observée lorsque l'état des objets détectés se dégrade. Une augmentation de la radiométrie indique une variation progressive. En revanche, une radiométrie inchangée est associée aux zones relativement stables, principalement constituées de sols nus et de bâtiments.

La figure suivante montre le principe de la technique de détection du changement appliquée dans notre étude.

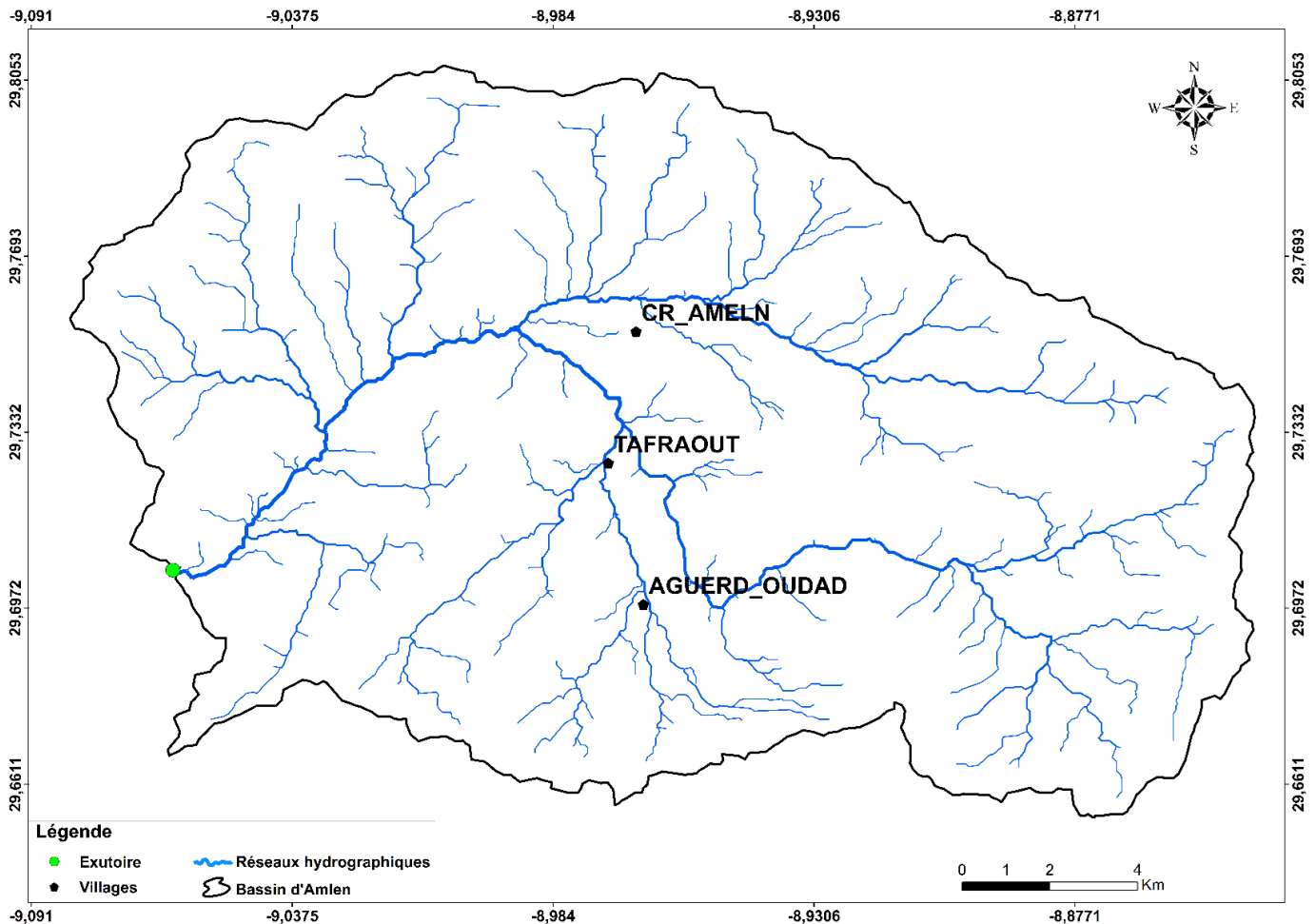


*Figure 10 : Différentes étapes de la détection du changement du couvert terrestre.*

## 4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 4.1 Généralités sur les caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin versant d'Amlen :

#### 4.1.1 Forme du bassin versant :



**Figure 11 : Carte montrant de la forme du bassin versant Amlen.**

#### 4.1.1.1 Les paramètres de bassin (km) :

##### 4.1.1.1.1 Surface et périmètre :

La surface d'un bassin est la portion du plan délimité par la ligne de crête, ou contour du bassin. Elle est mesurée à l'aide d'un planimètre ou bien par la méthode des petits carrés sur ARCGIS elle est généralement exprimée en  $Km^2$  (Figure 12).

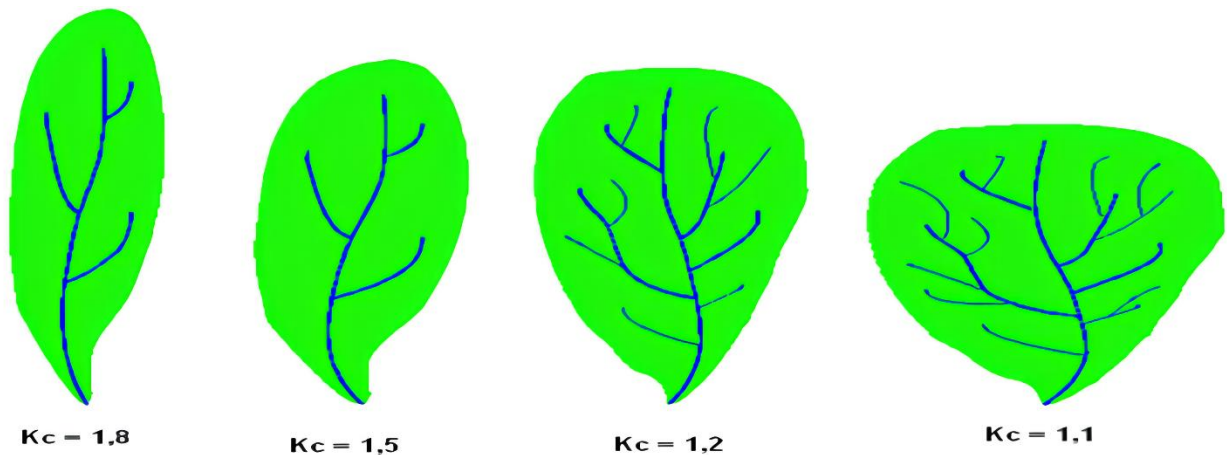
OBJECTID *	Shape *	Id	gridcode	Shape Length	Shape Area	SURFACE	périmètre
1	Polygon	1	1	0,788172	0,026783	288,1	81,07

**Figure 12 : Paramètres géométriques du bassin versant d'Amlen.**

#### 4.1.1.1.2 Indice de compacité :

L'indice de compacité est l'un des plus importants paramètres du bassin versant ; il sert à qualifier la forme du bassin et le comparer à un cercle de même surface pour lequel  $KC = 1$  (Figure 12).

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieure à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.



**Figure 13 : L'indice de compacité de Gravelius, 1914, KG (ou KC).**

Indice de compacité :

$$kG = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

**P** : périmètre du bassin en km (= 81,07 km)

**A** : est la surface du bassin en  $km^2$  (= 288,1  $km^2$ )

$$kG = 1,34$$

À travers ces résultats on peut dire que notre bassin versant est 3 fois plus long que large.

#### 4.1.1.1.3 Le rectangle équivalent :

La transformation géométrique du bassin réel, tout en conservant à la fois la même superficie et le même périmètre, constitue une démarche essentielle. Dans ce contexte, la notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius offre une méthode simple pour comparer la morphologie des bassins versants.

En géomorphologie, un rectangle équivalent (Figure 13) est un outil conceptuel utilisé pour comparer la morphologie des bassins versants. Il s'agit d'une représentation idéalisée de la forme géométrique idéale correspondant aux caractéristiques du bassin étudié. En utilisant cette notion, il devient possible de quantifier de manière objective les variations de forme entre différents bassins versants et de les comparer de manière standardisée. Ainsi, le rectangle équivalent offre une mesure pratique pour l'analyse comparative de la morphologie des bassins, permettant de mieux comprendre et interpréter leurs caractéristiques géométriques distinctes.

#### Longueur du rectangle équivalent :

On calcule la longueur du rectangle par la relation suivante :

$$L = KG \frac{\sqrt{A}}{1,12} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{kC} \right)^2} \right]$$

$$L = 31,45 \text{ km}$$

#### Largeur du rectangle équivalent :

$$l = KG \frac{\sqrt{A}}{1,12} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{kC} \right)^2} \right]$$

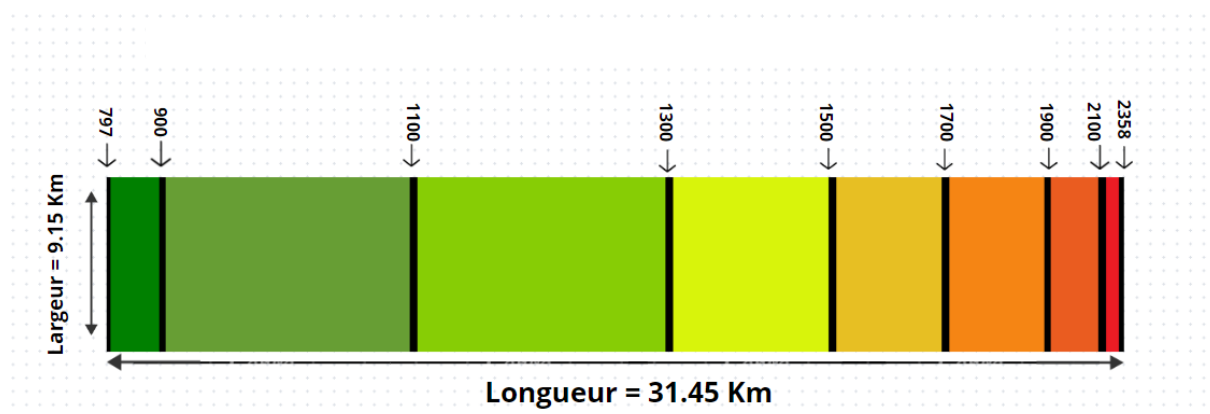
$$l = 9,15 \text{ km}$$

**KC** : indice de compacité

**A** : l'aire du bassin

**Tableau 4 : Paramètres du rectangle équivalent du bassin versant Amlen.**

Indice de compacité	Surface du bassin versant en $km^2$	Longueur du rectangle équivalent en km	Largeur du rectangle équivalent en km
<b>1.34</b>	<b>288.10</b>	<b>31.45</b>	<b>9.15</b>



**Figure 14 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Amlen.**

Le tracé des droites de niveau du rectangle découle directement de la répartition hypsométrique, c'est-à-dire des pourcentages cumulés des tranches d'altitude.

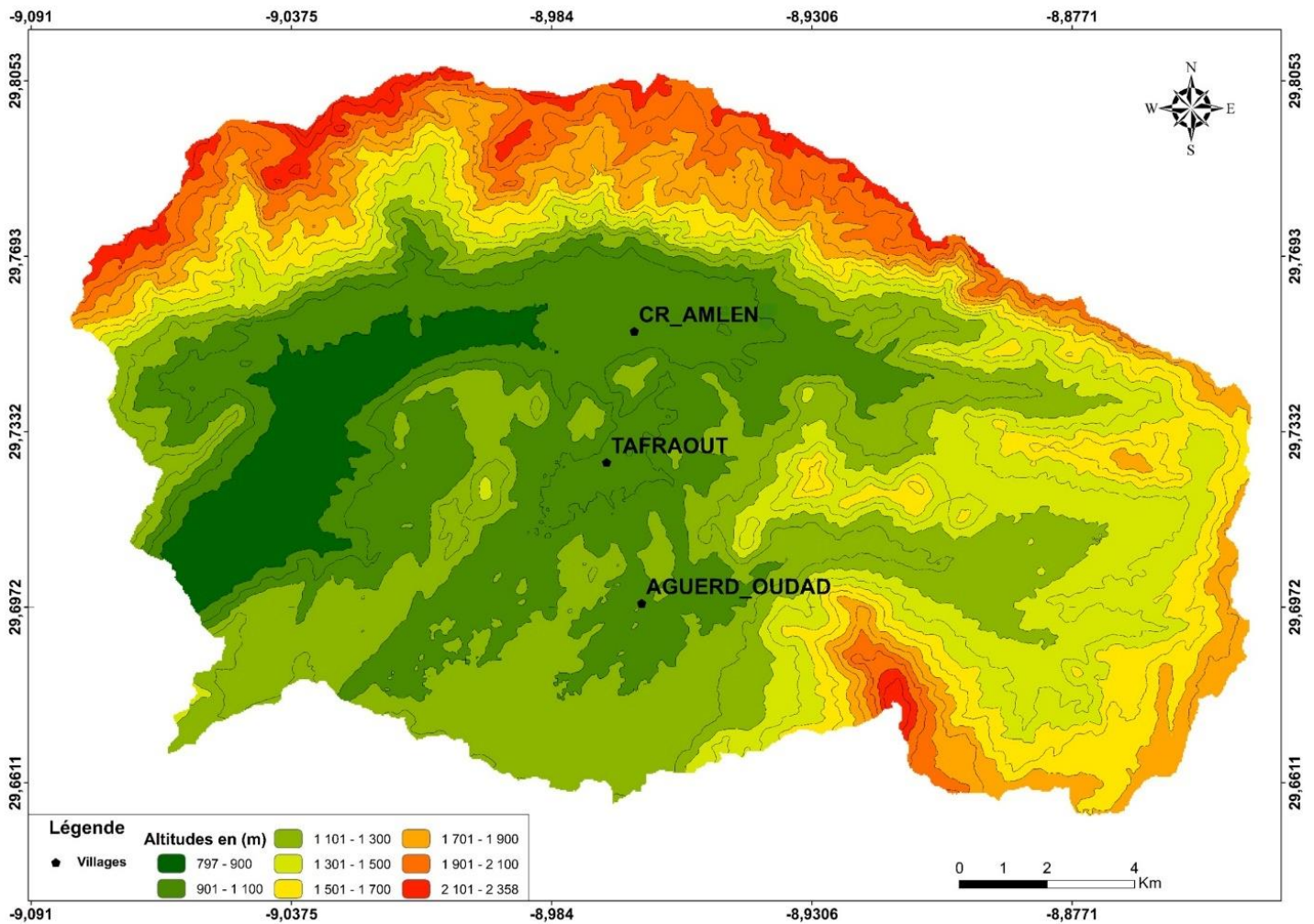
**Tableau 5 : Répartition des paramètres géométriques en fonction des tranches d'altitudes.**

Tranches d'altitudes (m)	surface ( $km^2$ )	longueur (km)	longueur (cm)
797-900	16,31	1,75	0,43
900-1100	70,05	7,66	1,91
1100-1300	73,31	8,01	2,00
1300-1500	45,62	4,99	1,25
1500-1700	31,78	3,47	0,90
1700-1900	25,41	2,78	0,69
1900-2100	19,16	2,09	0,52
2100-2358	6,46	0,71	0,17
<b>la somme</b>	<b>288,10</b>	<b>31,45</b>	<b>7,87</b>

## 4.1.2 Relief et carte hypsométrique

### 4.1.2.1 Carte hypsométrique du bassin versant d'Amlen :

La carte hypsométrique illustre la répartition des différentes valeurs d'altitude dans le bassin (Figure 14) ; ou elles varient entre 797m et 2358m. On remarque que les hautes altitudes se distribuent dans la partie nord du bassin ou il y a des fortes pentes. Tandis que les basses altitudes se distribuent dans la partie sud-ouest et centre de bassin.

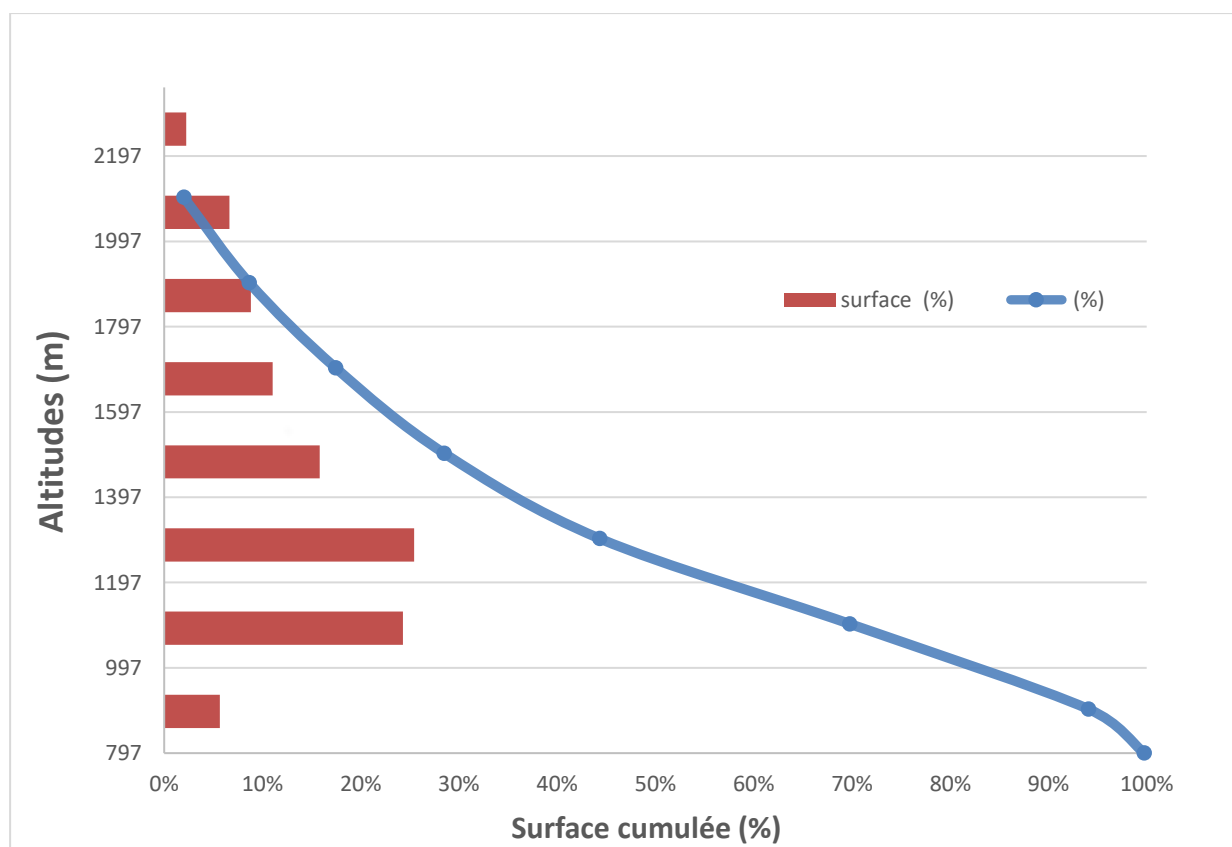


***Figure 15 : Carte hypsométrique du bassin versant d'Amlen.***

#### 4.1.2.2 La courbe hypsométrique :

**Tableau 6 : Répartition des tranches d'altitudes du bassin versant d'Amlen.**

Tranches d'altitudes (m)	surface (km <sup>2</sup> )	surface (km <sup>2</sup> ) cumulée	surface (%)	surface cumulée (%)	(%)
797-900	16,31	16,31	6%	6%	100%
900-1100	70,05	86,36	24%	30%	94%
1100-1300	73,31	159,67	25%	55%	70%
1300-1500	45,62	205,29	16%	71%	44%
1500-1700	31,78	237,07	11%	82%	29%
1700-1900	25,41	262,48	9%	91%	17%
1900-2100	19,16	281,64	7%	98%	9%
2100-2358	6,46	288,10	2%	100%	2%



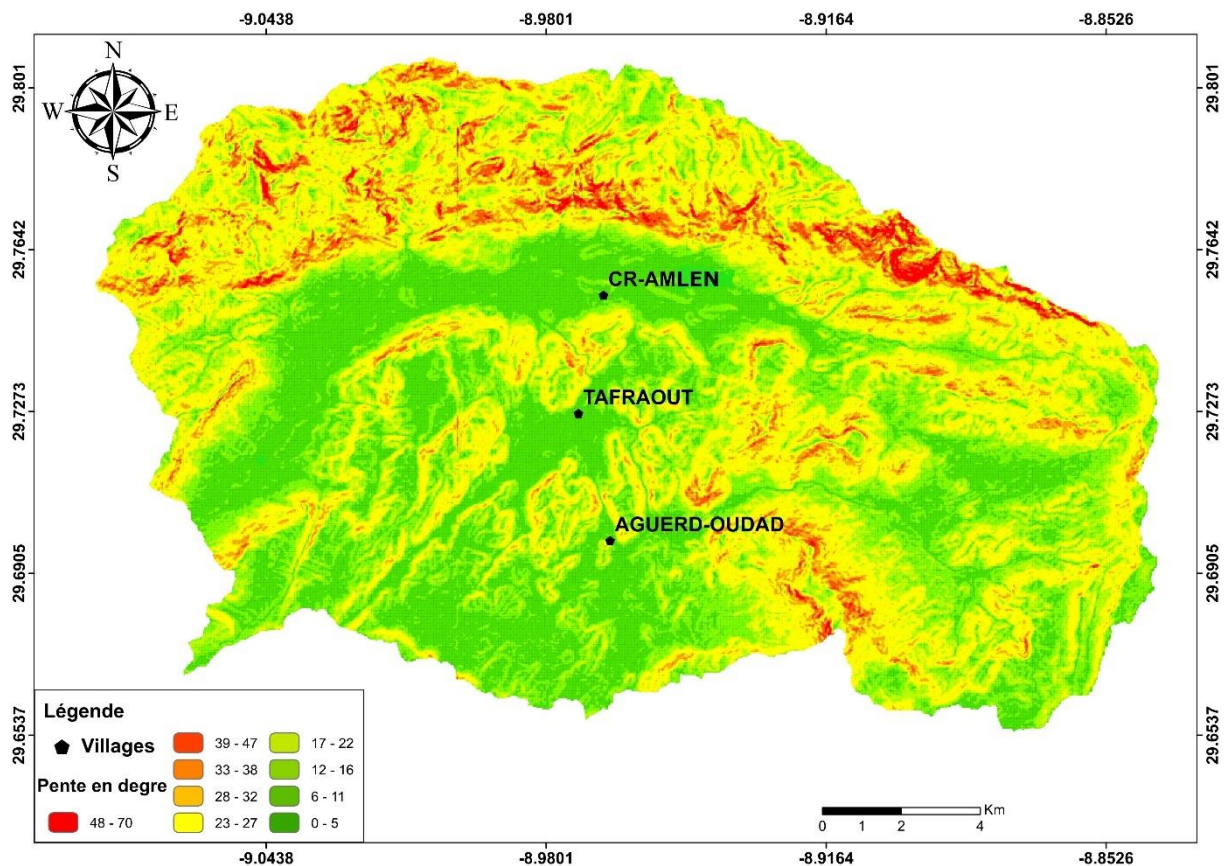
**Figure 16 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'Amlen.**



### 4.1.3 Les pentes

#### 4.1.3.1 Carte de pente :

La carte des pentes représente la répartition des valeurs de pentes dans le bassin, avec des variations allant de 0° à 70° (Figure 16). Dont les versants de grande valeur d'altitude se trouvent sur la partie nord du bassin. En revanche, les pentes plus douces sont davantage présentes dans la partie sud-ouest du bassin.



***Figure 17 : Carte de pente du bassin versant d'Oued d'Amlen.***

#### 4.1.3.2 Caractéristiques topographiques du bassin versant d'Oued Amlen :

- ✓ L'altitude moyenne : Permet d'analyser les lois réglant les précipitations et le ruissellement superficiel.
- ✓ L'altitude maximale : C'est l'altitude la plus fréquente (ou le mode), représentant le point le plus élevé du bassin.
- ✓ L'altitude minimale : Représente le point le plus bas du bassin situé généralement à l'exutoire.
- ✓ L'altitude médiane : L'altitude lue, sur la courbe hypsométrique, au point d'abscisse 50%.



**Tableau 7 : Récapitulation des caractéristiques topographiques du BV d'Amlen.**

Altitudes caractéristiques(m)				Indices de pente (%)			Dénivelée (m)	Pente de l'écoulement (%)
H max	H min	H moy	H médiane	Ip	Ig	Pmoy	1131.44	4.68
2385	797	1577.5	1253.84	4.96	3.59	9.43		

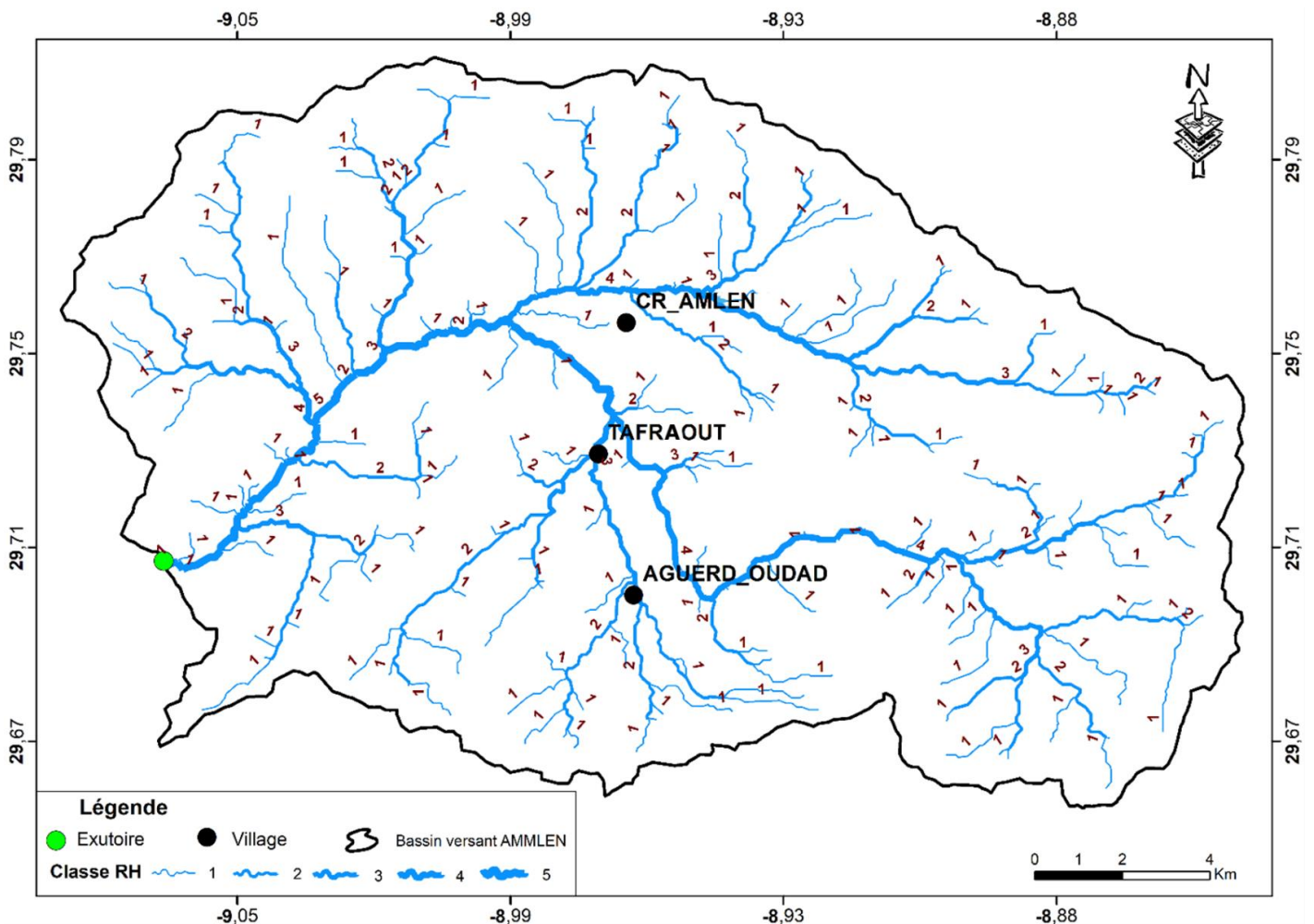
**Tableau 8 : Méthodes de calculs les caractéristiques topographiques du bassin versant.**

<p><b>Pente moyenne de l'écoulement :</b></p> $P = (H_{\max} - H_{\min}) / L \times 100$ $P = (2358 - 797) / (33.31 \times 10^3) \times 100$ $P = 4.68\%$	<p><b>P :</b> pente moyenne de l'écoulement  <b>H max :</b> l'altitude max du cours d'eau  <b>H min :</b> l'altitude min du cours d'eau  <b>L :</b> longueur du cours d'eau en (m)</p>
<p><b>Indice de pente :</b></p> $I_p = (H_{\max} - H_{\min}) / (L_{eq}) \times 100$ $I_p = (2358 - 797) / (31.45 \times 10^3) \times 100$ $I_p = 4.96\%$	<p><b>I<sub>p</sub> :</b> indice de pente  <b>H max et H min :</b> sont respectivement les altitudes max et min de notre cours d'eau  <b>L<sub>eq</sub> :</b> longueur du rectangle équivalent en (m)</p>
<p><b>Dénivelé :</b></p> $D_u = H_{5\%} - H_{95\%}$ $D_u = 2014.286 - 882.84$ $D_u = 1131.44 \text{ m}$	<p><b>D<sub>u</sub> :</b> dénivelé en (m)</p>
<p><b>Indice de pente globale :</b></p> $I_g = D / (L_{eq}) \times 100$ $I_g = 1131.44 / (31.45 \times 10^3) \times 100$ $I_g = 3.59\%$	<p><b>I<sub>g</sub> :</b> indice de pente globale  <b>D :</b> dénivelé en (m)  <b>L<sub>eq</sub> :</b> longueur du rectangle équivalent en (m)</p>
<p><b>Pente moyenne du bassin :</b></p> $P_m = 2 H_{moy} / L \times 100$ $P_m = 2 \times 1253.84 / (33.31 \times 10^3) \times 100$ $P_m = 9.43\%$	<p><b>P<sub>m</sub> :</b> pente moyenne du bassin versant  <b>H moy :</b> correspond à l'altitude moyenne le long du cours d'eau  <b>L :</b> longueur du cours d'eau en (m)</p>

## 4.2 Caractéristiques hydrologiques du bassin versant :

### 4.2.1 Carte de réseau hydrographique :

La carte du réseau hydrographique permet de comprendre la dynamique de l'eau dans une région donnée (Figure 17). Les cours d'eau principaux sont généralement présents dans les zones de basse altitude, tandis que les ramifications plus petites se trouvent dans les zones de haute altitude. L'écoulement de l'eau se dirige vers la partie ouest du bassin, ce qui peut entraîner la présence de vallées et de petits lacs dans cette région. L'analyse de cette carte est essentielle pour la gestion des ressources en eau, la planification des infrastructures, la prévention des inondations et la préservation des écosystèmes aquatiques. Elle permet de mieux comprendre la répartition des cours d'eau, les caractéristiques du relief et les interactions entre l'eau et le paysage.



#### 4.2.2 Densité de drainage :

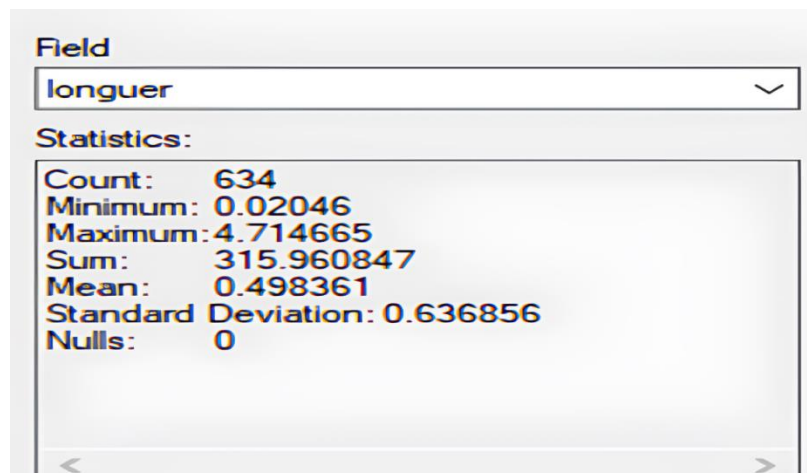
La densité de drainage est une mesure qui exprime le nombre de cours d'eau ou de canaux de drainages présents dans une région donnée, en proportion de sa superficie. Pour la calculer, on divise la longueur totale des cours d'eau par la superficie du bassin versant.

Une densité de drainage élevée est le signe d'un réseau de drainage dense et bien développé. Cela implique qu'il y a de nombreux cours d'eau ou canaux de drainage présents par unité de surface. Une telle densité peut être observée dans les régions où le relief est marqué, avec de nombreux ruisseaux, rivières et affluents.

Une densité de drainage plus faible peut indiquer un réseau de drainage moins développé, avec moins de cours d'eau présents dans la région. Cela peut être dû à des facteurs géographiques spécifiques, tels qu'un relief plus plat ou une moins grande disponibilité d'eau.

La densité de drainage est une mesure importante en hydrologie, car elle permet de comprendre la configuration et la structure du réseau de drainage d'une région. Elle est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la gestion des ressources en eau, l'aménagement du territoire et l'étude des écosystèmes aquatiques.

$$\text{Densité de drainage} = \frac{\text{la somme du cour d'eau dans le bassin (km)}}{\text{superficie de bassin (km}^2\text{)}}$$



The screenshot shows a software window with a dropdown menu set to 'longuer'. Below it, a 'Statistics:' section displays the following data:

Field	Value
Count	634
Minimum	0.02046
Maximum	4.714665
Sum	315.960847
Mean	0.498361
Standard Deviation	0.636856
Nulls	0

On a : **surface= 288,10 km<sup>2</sup>**

**la somme du cour d'eau(Sum)= 315.960847km Donc: DD=1 .096 Km/Km2**

### 4.2.3 Temps de concentration :

Le temps de concentration correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire. On trouve beaucoup de relation qui permet de le calculer.

**Tableau 9 : Les formules de calcul du temps de concentration.**

<b>Formule de Giandott</b>  $Tc = \frac{1.5L + 4\sqrt{S}}{0.8\sqrt{D}}$	Tc en heures S : Superficie du bassin versant en km <sup>2</sup> L : longueur du cours d'eau (km) D : dénivelée (m)
<b>Formule de Ventura</b>  $Tc = 0.1272\sqrt{S/I}$	Tc en heures. S : Superficie du bassin versant en km <sup>2</sup> I : pente du cours d'eau m/m
<b>Formule de Kripich</b>  $Tc = \frac{0.01947 \times L^{0.77} \times I^{-0.385}}{60}$	Tc en heures L : Longueur du cours d'eau(m). I : Pente moyenne du bassin m/m.
<b>Formule d'Espagnole</b>  $Tc = 0.3 \times 60 \times \left(\frac{L}{P^{0.25}}\right)^{0.77}$	Tc en min L : la longueur du cours d'eau en km I : la pente en m/m.
<b>Formule de Turrazza</b>  $Tc = \frac{60 \times 0.108 \times \sqrt[3]{S \times L}}{\sqrt{P}}$	Tc en min L : la longueur du cours d'eau en km P : la pente en m/m
<b>Formule de Carlifonienne</b>  $Tc = 60 \times 0.1452 \times \left(\frac{L}{\sqrt{P}}\right)^{0.77}$	Tc en min L : la longueur du cours d'eau en km P : la pente en m/m.

**Tableau 10 : Récapitulation du calcul de temps de concentration.**

	Giandotti	Ventura	Kripich	L'Espagnole	Turrazza	Californienne
Tc(min)	262.8	60	24.6	421.75	448.43	321.60
Tc(h)	4.38	1	0.41	7.03	7.47	5.36

Pour un bassin versant de 288 km<sup>2</sup>, afin de déterminer la valeur du temps de concentration, il est courant de calculer la moyenne des valeurs proches et logiques. Cela implique d'éliminer les valeurs extrêmes, c'est-à-dire les valeurs très petites ou très grandes qui pourraient fausser le résultat.

**Tableau 11 : Les valeurs retenues du temps de concentration.**

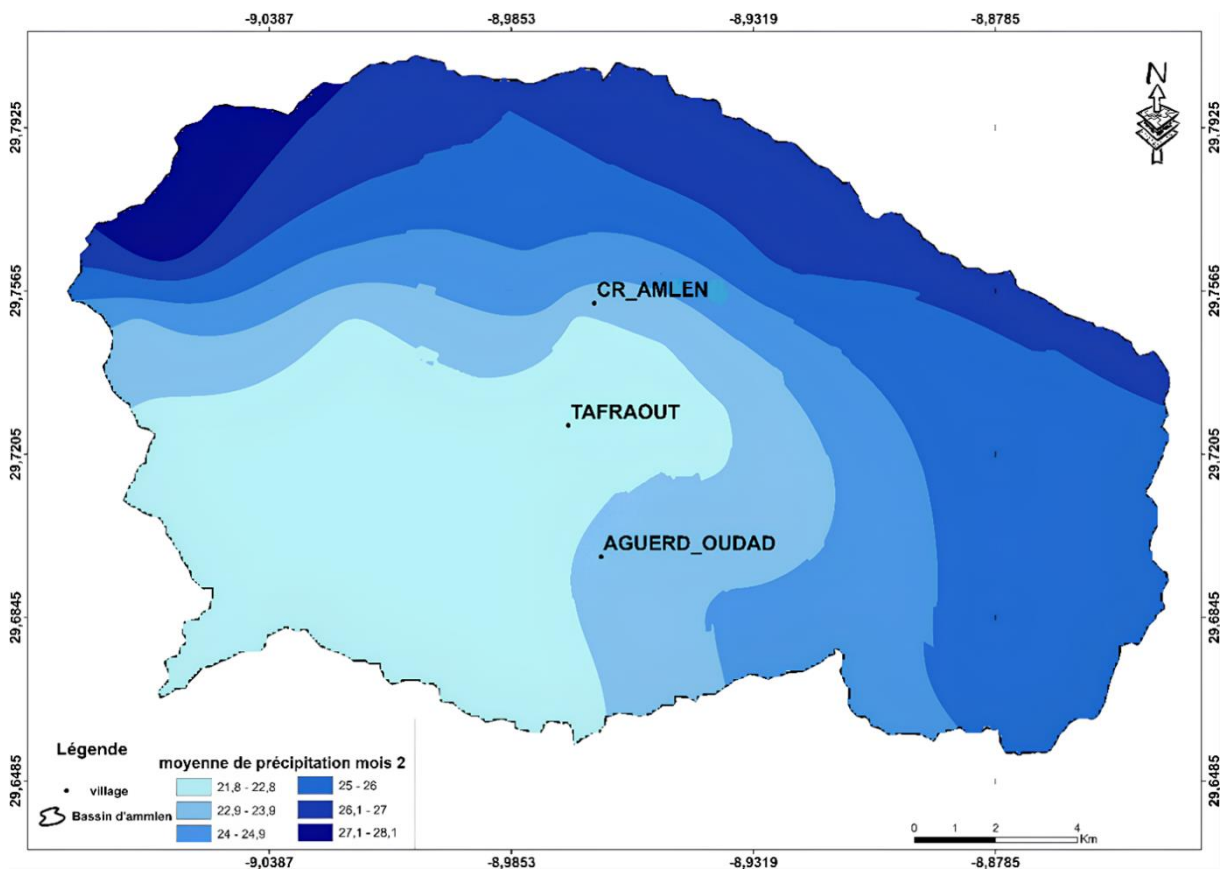
Formules	Temps de concentrations en heurs
Giandotti	<b>4.38</b>
Californienne	<b>5.36</b>

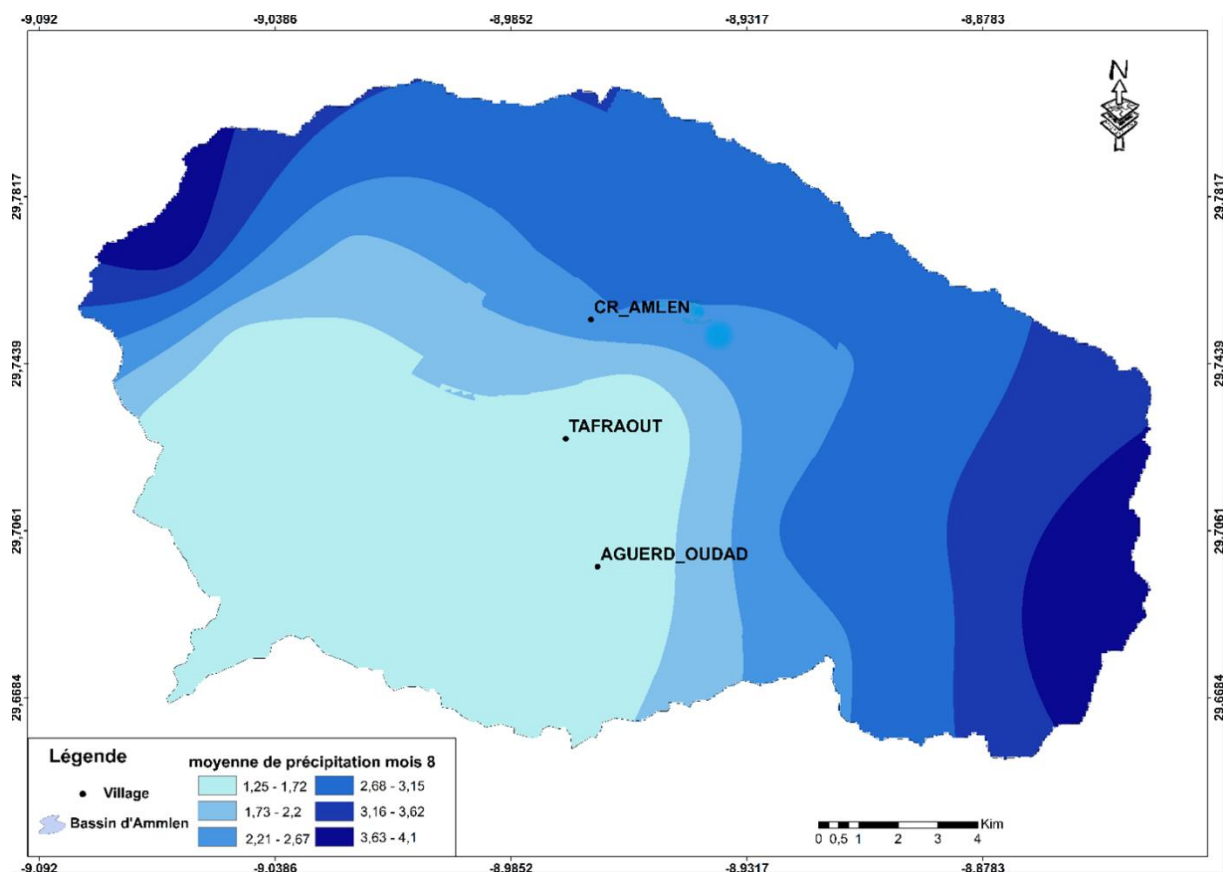
La moyenne des deux valeurs retenues donne la valeur finale du temps de concentration :

$$T_c = \frac{4.38 + 5.36}{2} = 4.87 \text{ heures}$$

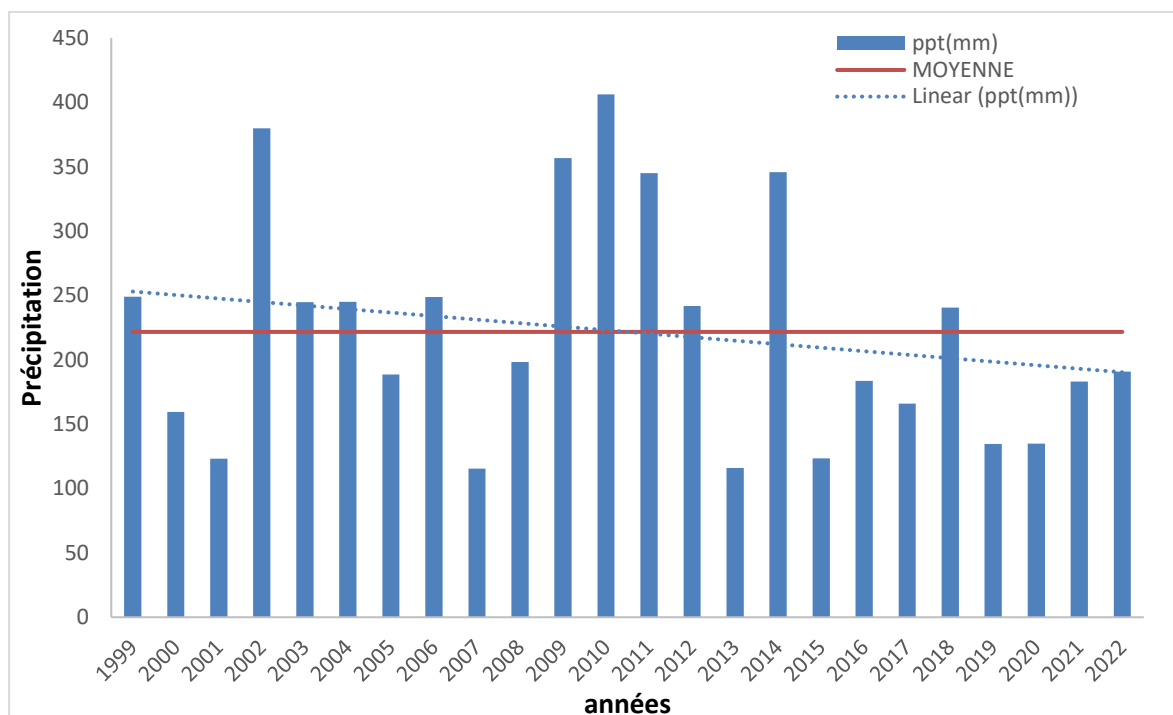
#### 4.2.4 Pluviométrie et carte de précipitation :

En utilisant la méthode IDW sur ARCGIS, deux cartes ont été créées pour représenter la répartition spatiale des précipitations dans la région d'Amlen (Figure 18). La première carte concerne le mois de février, avec une moyenne mensuelle de 28 mm de précipitations. En revanche, la seconde carte correspond au mois d'août, affichant une moyenne très faible de seulement 4 mm de précipitations. Dans les deux cartes, une tendance similaire se dégage : les zones de haute altitude sont généralement caractérisées par des précipitations plus importantes. Ainsi, il existe une corrélation entre l'altitude et les niveaux de précipitations observés dans la région d'Amlen.





**Figure 19 : Carte de précipitation moyenne du mois 2 et 8 2022 de bassin d'Ammlen.**



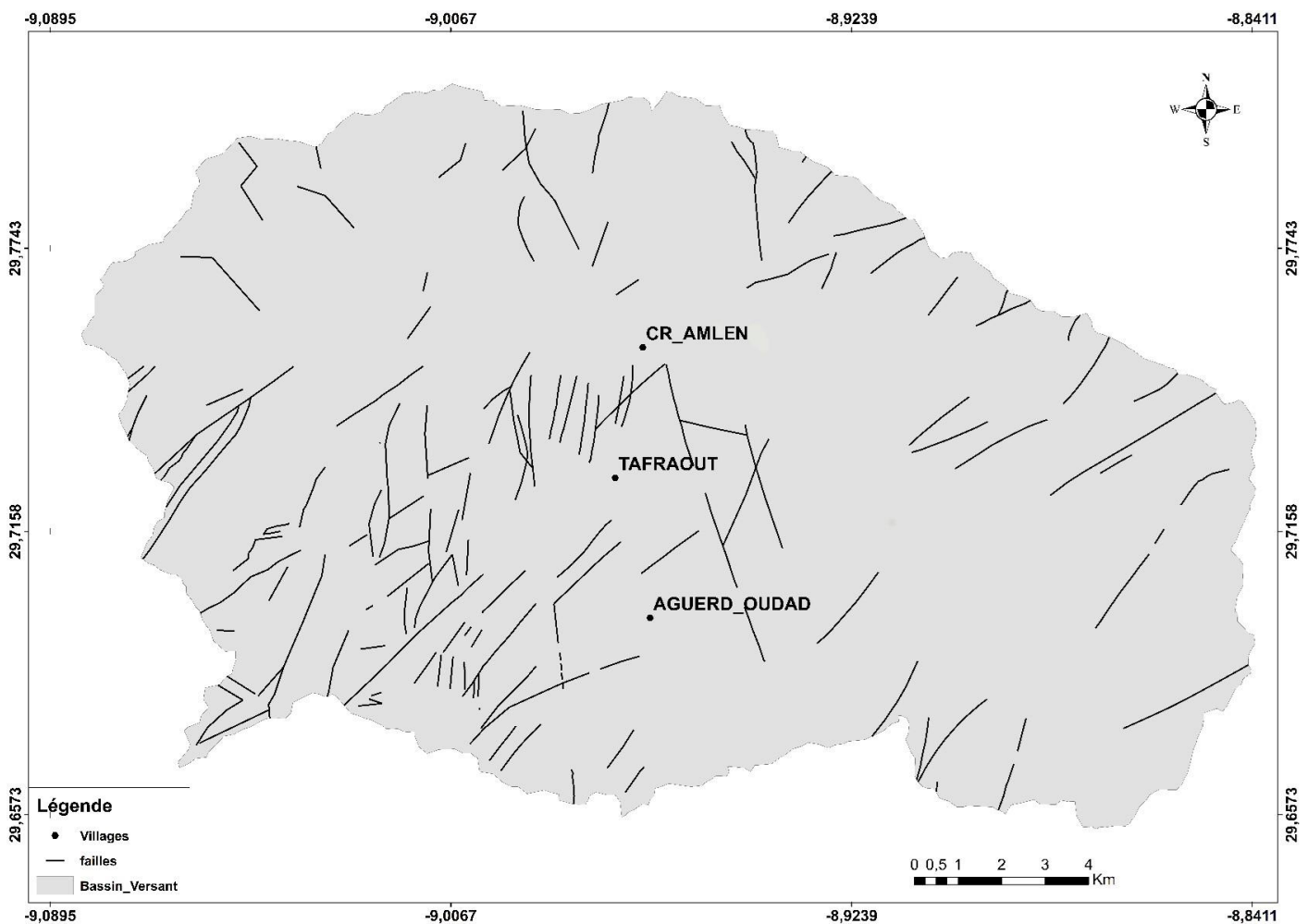
**Figure 20 : Diagramme représentant la somme des précipitations annulées depuis 1999 jusqu'à 2022.**

(<https://climate.northwestknowledge.net/nwtoolbox/formatteddownloads.php>)

#### 4.2.5 Zones de recharge de la nappe :

La zone de recharge d'une nappe est l'endroit où l'eau de pluie s'infiltré dans le sol pour recharger la nappe phréatique (Figure 20). Les bassins versants, en général, jouent souvent un rôle important en tant que zones de recharge pour les nappes.

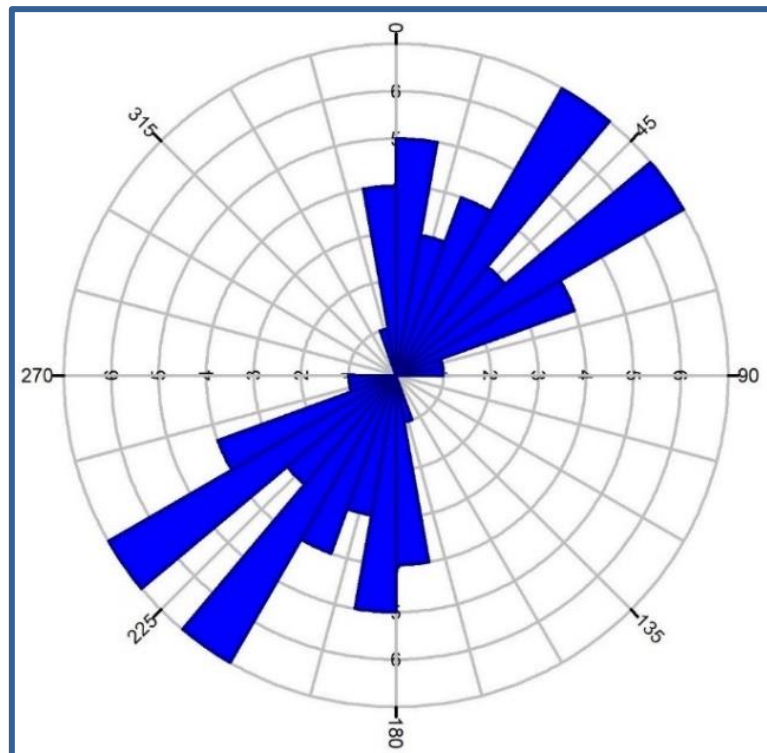
Quant aux failles, elles peuvent être considérées comme des zones de recharge potentielle car elles peuvent permettre à l'eau de s'infiltrer dans les couches souterraines. Cependant, la capacité d'une faille à servir de zone de recharge dépend de la nature et de la perméabilité des roches qui composent la faille elle-même. Certaines failles peuvent agir comme des conduits préférentiels pour l'infiltration de l'eau, tandis que d'autres peuvent avoir des propriétés imperméables, limitant ainsi leur potentiel de recharge. Il est important de comprendre la géologie spécifique de la région pour évaluer le rôle des failles en tant que zones de recharge pour les nappes.



***Figure 21 : Carte de faille du bassin d'Amlen.***

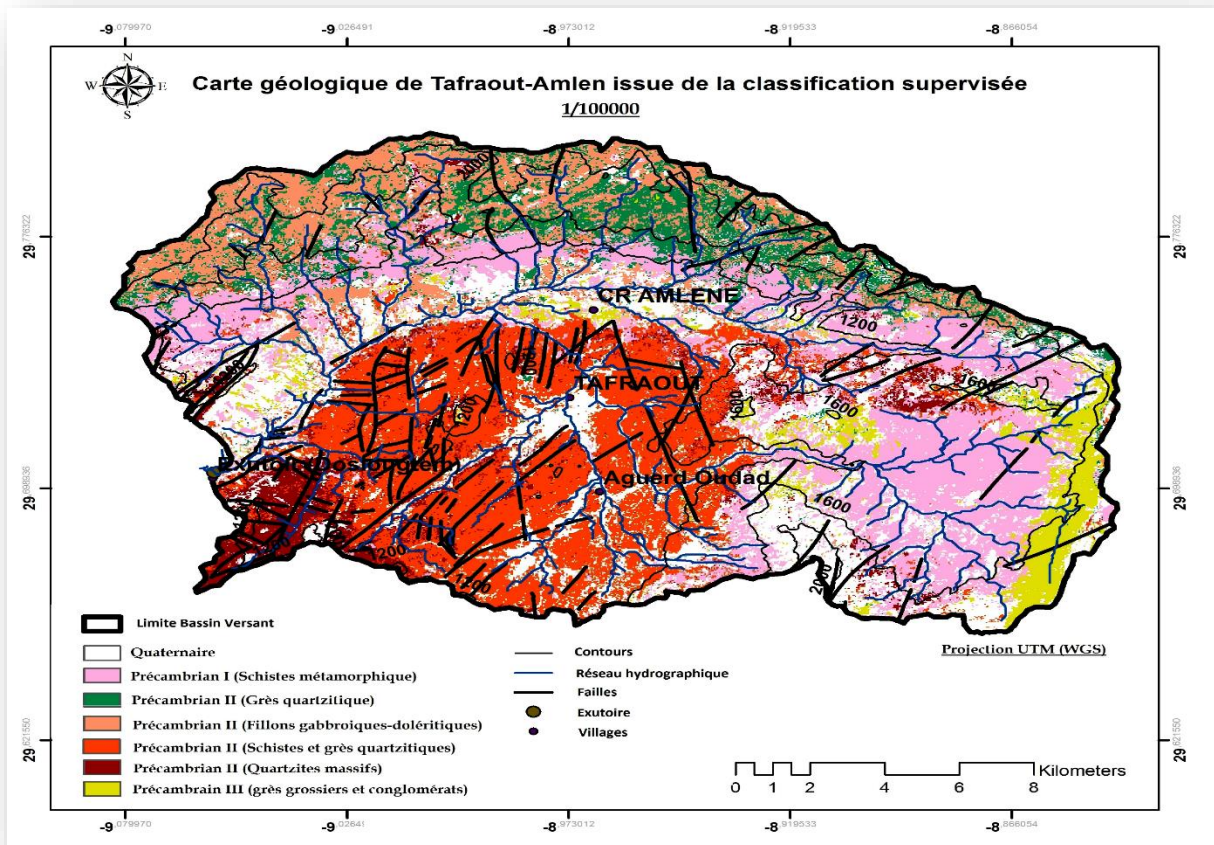


La rosace des failles indique que la direction prédominante des failles est NE-SW (Figure 21). La taille relative des secteurs dans la rosace permet d'évaluer la fréquence ou la densité des failles dans chaque plage angulaire. Les secteurs plus grands dans la direction NE-SW suggèrent une concentration plus élevée de failles dans cette orientation spécifique. Cette information permet d'identifier la tendance structurale des failles et de mieux comprendre les processus géologiques qui ont influencé la formation de la région étudiée.



**Figure 22 : Rosace montre la direction de contrainte principal.**

Pour compléter la carte géologique, nous avons réalisé une continuité logique dans les zones non couvertes par les cartes géologiques existantes (carte géologique TAFRAOUT 1/100000 et carte géologique HAD N TAHALA 1/50000) en utilisant la méthode de classification supervisée sur une image satellitaire (Figure 22).

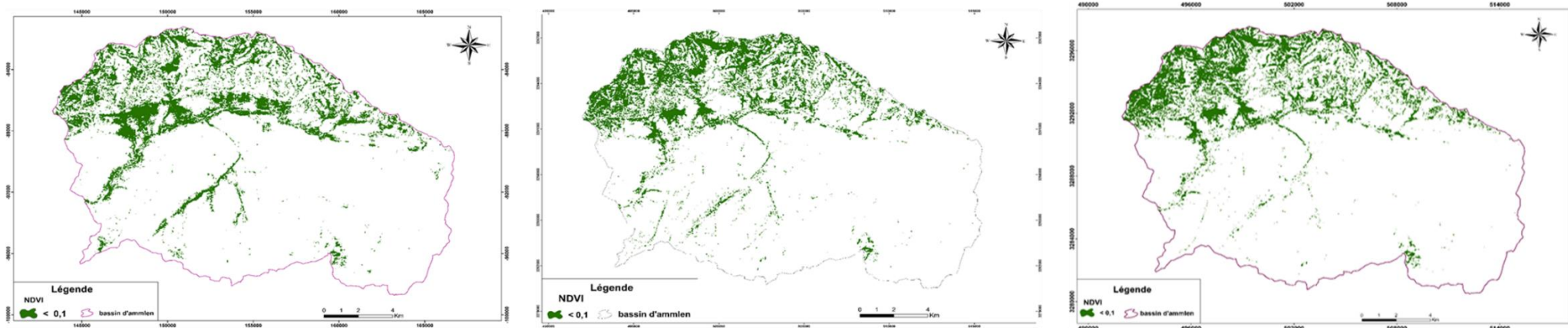


***Figure 23: Carte géologique de Taфраout – Amlen issue de la classification supervisée.***

## **4.3 Végétation et occupation du sol :**

### **4.3.1 Indice de végétation (NDVI)**

Les analyses des indices de végétation dans notre bassin révèlent une densité végétale plus importante pendant la période hivernale, en particulier dans la partie amont du bassin. Cependant, au cours de l'été, la végétation montre une dispersion. Cette variation peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que la température et les précipitations. La combinaison de températures plus froides en hiver et d'une plus grande disponibilité en eau grâce aux précipitations favorise une densité accrue de la végétation. En revanche, pendant l'été, les valeurs de température sont très élevées avec une diminution des précipitations peuvent influencer négativement le couvert végétal. Cependant, il convient de noter que d'autres éléments, tels que la nature du sol et l'exposition des reliefs peuvent également jouer un rôle dans ces variations saisonnières de la végétation (Figure 23).



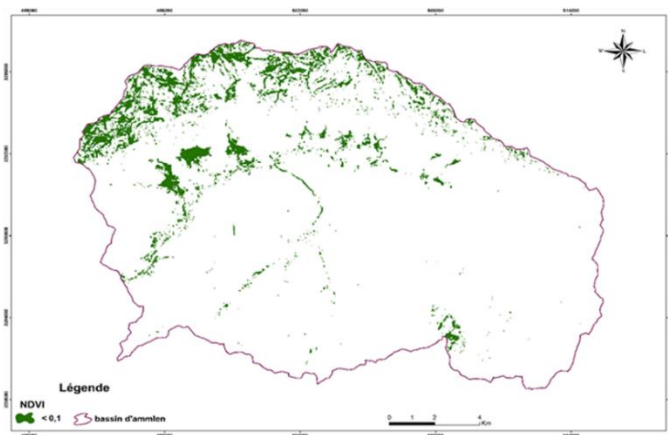
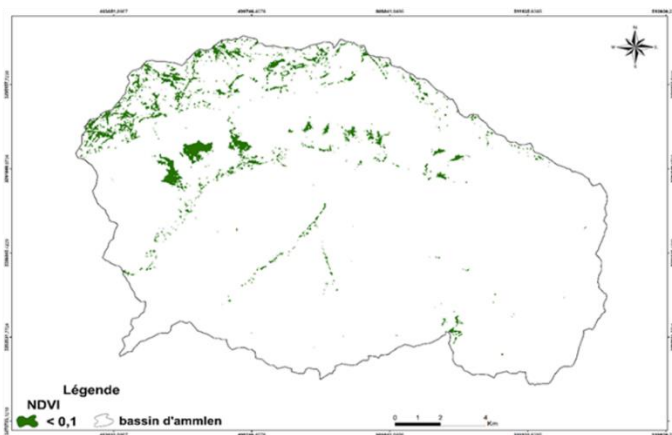
02/1999

02/2022

02/2023

08/1999

08/2022

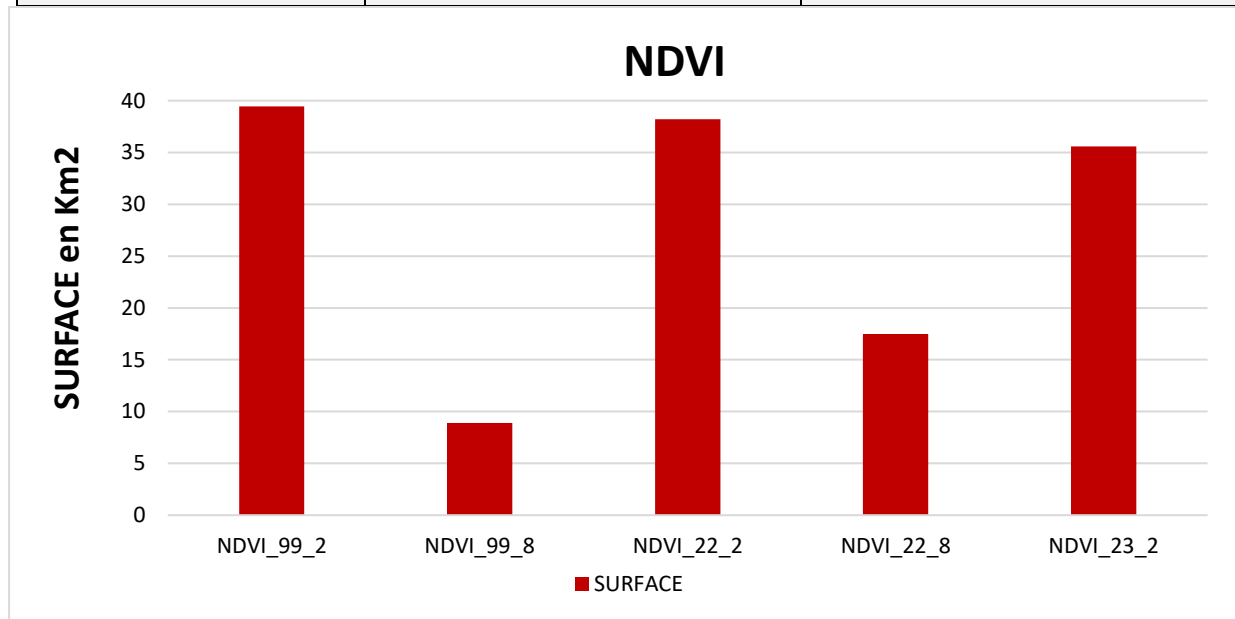


**Figure 24: Les cartes NDVI du Bassin versant d'Amlen**

(<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

POUR NDVI > 0,1

ANNES	NDVI	SURFACE en km2
Févr-99	NDVI_99_2	39,45
Août-99	NDVI_99_8	8,89
Févr-22	NDVI_22_2	38,2
Août-22	NDVI_22_8	17,49
Févr-23	NDVI_23_2	35,58



**Figure 25 : Diagramme représentant l'évolution du couvert végétale pendant les années 1999, 2022 et 2023.**

Il existe plusieurs facteurs potentiels de diminution de la couverture végétale pendant l'été dans les régions semi-arides. La première cause est la pénurie d'eau. Ces régions se caractérisent par des précipitations limitées et irrégulières, ce qui signifie que lorsque les températures augmentent, la demande en eau des plantes augmente également. En l'absence d'apport d'eau suffisant, les plantes peuvent se dessécher, ce qui entraîne une diminution de la couverture végétale.

Le deuxième facteur est la sécheresse. Les périodes de sécheresse prolongées peuvent réduire l'humidité du sol, ce qui crée des conditions difficiles pour la survie des plantes et leur capacité à maintenir une couverture végétale saine.

Le troisième facteur est les incendies (Figure 25). Les régions semi-arides sont particulièrement vulnérables aux incendies, surtout pendant les périodes sèches et chaudes.



Ces incendies peuvent être déclenchés par des causes naturelles telles que la foudre, mais aussi par des activités humaines, comme les feux de forêt non maîtrisés. Les incendies de végétation peuvent rapidement détruire la végétation existante, entraînant ainsi une diminution de la couverture végétale dans la région.

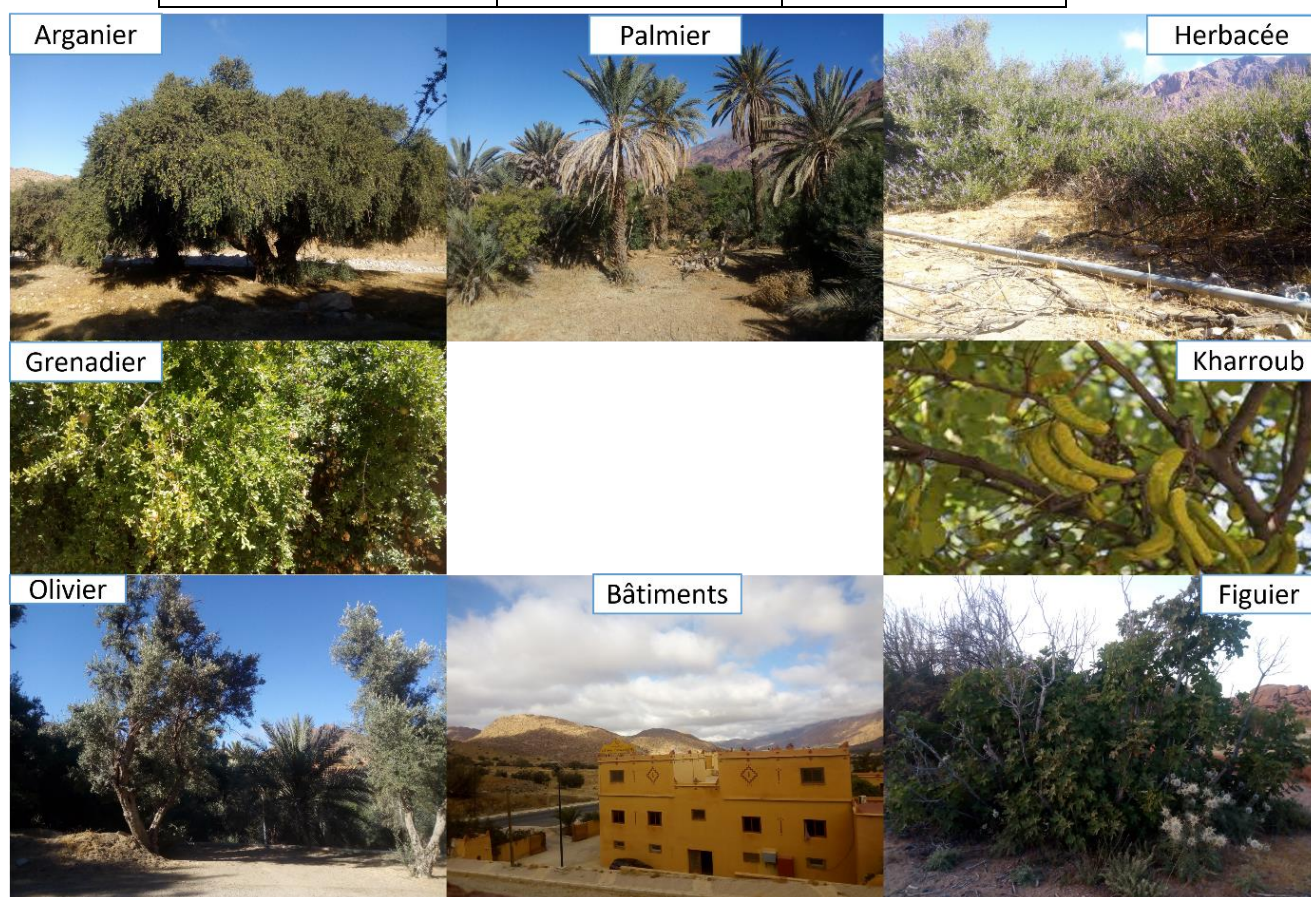


**Figure 26 : Les incendies qui ont affecté le couvert végétal d'Amlen.**



**Tableau 12 : Les différents types de végétation et leurs NDVI dans l'été et l'hiver.**

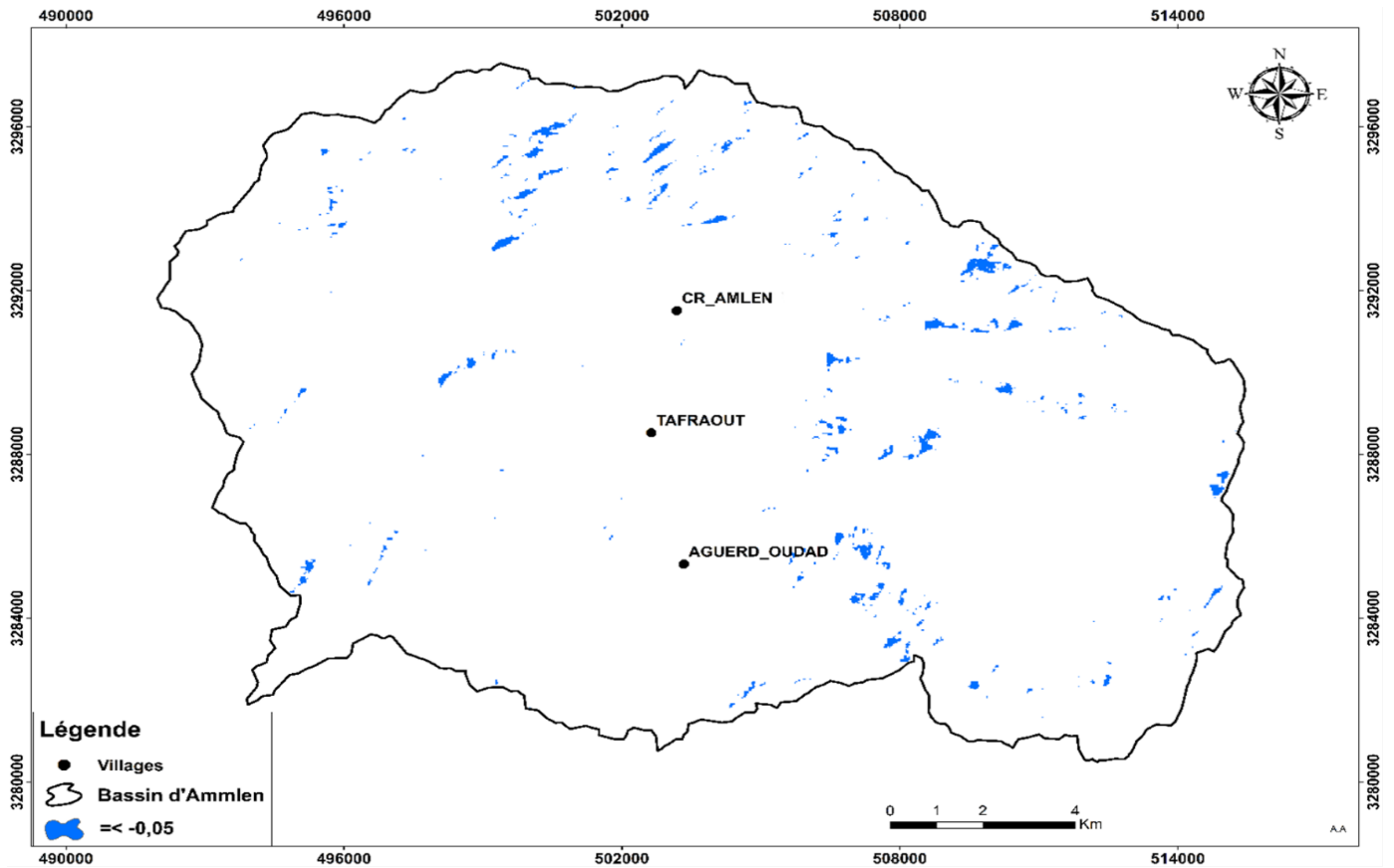
Types de végétation	NDVI Mois 8	NDVI Mois 2
Herbacée	0,0780135	0,078059
Arganier	0,0347521	0,095295
Palmier	0,130819	0,194327
Olivier	0,23483683	0,238225
Figuier	0,074096	0,07409
Grenadier	0,080063	0,080063
Bâtiments	0,0578115	0,058449
Kharroub	0,190441	0,190441



**Figure 27 : les différents types de végétation d'Amlen.**

### 4.3.2 Indice d'eau (NDWI) :

En raison des schémas de circulation atmosphérique et de la topographie des zones de haute altitude, les précipitations y sont généralement plus abondantes. Les montagnes agissent comme des réservoirs naturels, ce qui explique la présence de multiples sources d'eau naturelles. De plus, en raison de la nature du sol et des formations géologiques, l'eau s'infiltrerait rapidement et contribue à l'alimentation de la nappe phréatique.



***Figure 28 : Carte NDWI du bassin versant d'Amlen.***

[\(https://earthexplorer.usgs.gov/\)](https://earthexplorer.usgs.gov/)

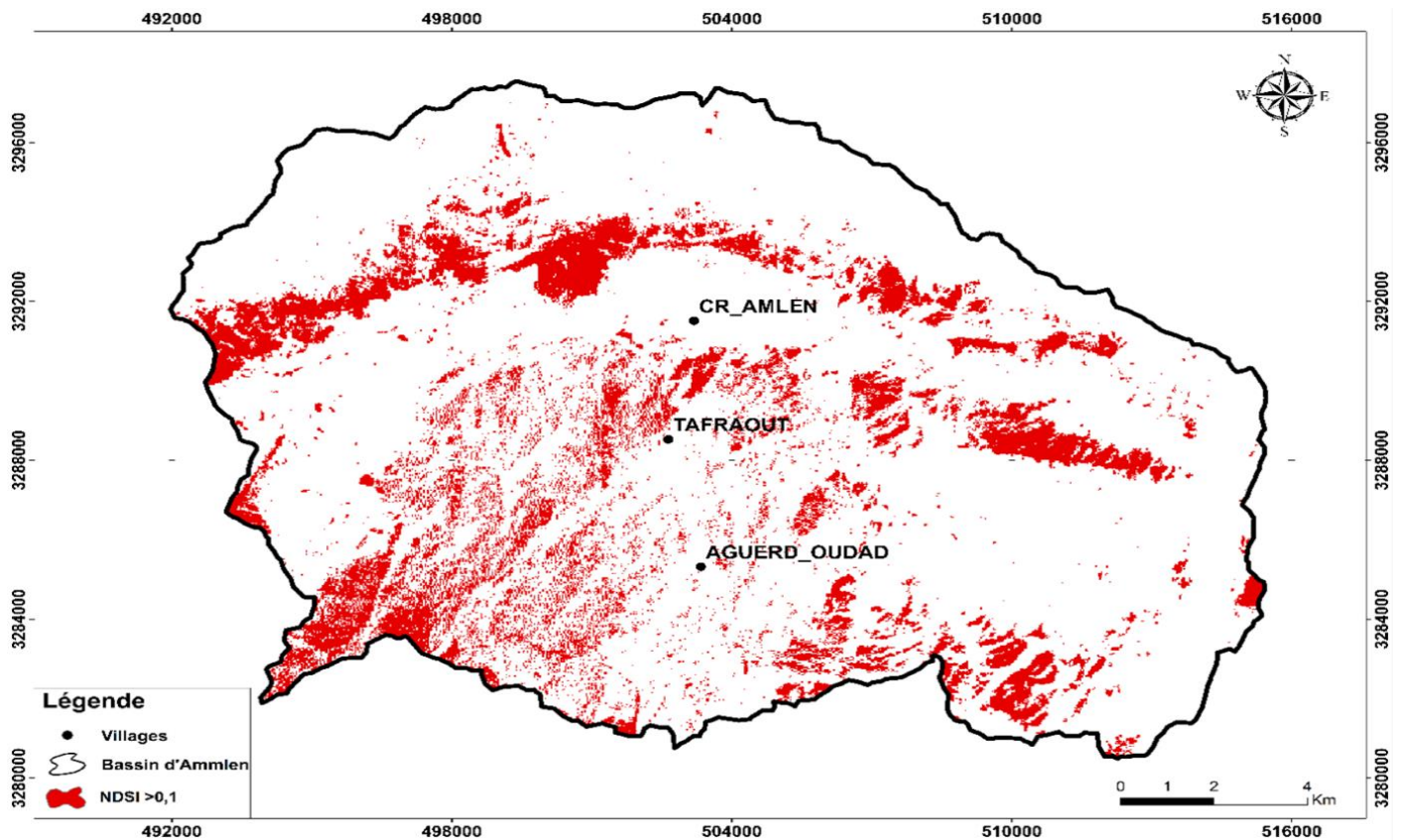
Pour NDWI > -0,05

ANNEE	NDWI	SURFACE en Km2
Févr-23	> -0,05	2,9673



### 4.3.3 Indice du sol (NDSI) :

Les régions de haute altitude avec des pentes abruptes connaissent un phénomène d'érosion actif en raison des conditions climatiques rigoureuses, ce qui limite le développement du sol. Les matériaux du sol sont emportés par les précipitations et les mouvements de terrain, empêchant l'accumulation de sol dans ces zones. En revanche, les basses altitudes avec des pentes plus douces connaissent un phénomène de sédimentation, favorisant la présence de sol. Les matériaux transportés par l'eau et le vent se déposent et s'accumulent, créant des conditions propices au développement du sol. De plus, certaines plantes sont adaptées à des types spécifiques de sol, ce qui influence leur distribution géographique et leur capacité à se développer dans différentes régions. Ainsi, les conditions climatiques, les mouvements de terrain et les adaptations des plantes contribuent à la diversité et à la répartition des sols dans les différentes altitudes et pentes des régions.



**Figure 29 : Carte NDSI du bassin versant d'Amlen.** (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Pour NDSI > 0.1

ANNEE	NDSI	SURFACE en Km2
Févr-23	> 0,1	44,3106

## **5 CONCLUSION GENERALE :**

Notre étude du bassin d'Amlen nous permet d'obtenir des informations plus précises sur notre zone d'étude grâce à l'utilisation d'un système d'information géographique et de la télédétection. Ces outils nous permettent de suivre les variations du couvert végétal et nous constatons qu'il est plus dense pendant la période hivernale que pendant la période estivale.

Les valeurs de NDWI sont très faibles en raison du type de climat de la région. Le calcul de NDSI révèle l'absence de sol dans les zones de haute altitude du bassin et sa présence dans les zones de basse altitude. Cela peut s'expliquer par deux phénomènes : l'érosion et la sédimentation. Nous pouvons également identifier les zones de recharge en eau.

Les caractéristiques géométriques telles que la forme (rectangle équivalent, indice de compacité, etc.) nous donnent une estimation de la géométrie de notre bassin. Nous constatons qu'il est trois fois plus long que large. De plus, le calcul du temps de concentration, qui est relativement court, indique que notre bassin est plus sensible aux crues.

Toutes ces informations nous permettent en fin de compte d'atteindre notre objectif, qui est de préciser les caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques du bassin.

## 6 Références

**Assoma, T.V.** (2014, 12 2). Télédétection et SIG "analyse spatiale". pp. 5-17.

**Durable, A. d.** (2017, 8). Principes de base de la télédétection spatiale. p. 3.

**Kergomard, C.** (1990). La télédétection aérospatiale : une introduction. Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris. p. 1.

**Salim A.** (2018). Apport de la télédétection dans l'évolution de la couverture végétale sur le versant Nord du Haut Atlas de Marrakech au cours de ces 30 dernières années. p. 17.

### Web site

*<https://climate.northwestknowledge.net/nwtoolbox/formatteddownloads.php>. s.d.*

*<https://earthexplorer.usgs.gov/>. s.d.*

*<https://opentopography.org/>. s.d.*

*[https://planificateur.a-contresens.net/afrique/maroc/ma\\_09/tafraout/2531877.html](https://planificateur.a-contresens.net/afrique/maroc/ma_09/tafraout/2531877.html). s.d.*

*<https://www.reussir.fr/lait/la-teledetection-pour-piloter-le-paturage>. s.d.*