

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DE M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE HYDRAULIQUE**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de :**

**MASTER**

**Filière : HYDRAULIQUE**

**Option: OUVRAGES HYDRAULIQUES**

**THEME**

**Cartographie de l'indice k et code b de  
la perméabilité des formations  
superficielles du sol  
Cas du bassin versant Oued El Hai**

**Dirigé par :**

**Mr. BERGHOUT Ali .**

**Présenté par :**

**AOUIDJI Mohamed.**

**Promotion: 2024/2025.**

## ملخص

تندرج الدراسة المقدمة في هذه المذكرة في اطار برنامج بحث حول إعداد خرائط لمعامل النفاذية  $k$  ورمز النفاذية  $b$ ، وهما مؤشران أساسيان لقياس نفاذية التكوينات السطحية للتربة، وذلك في حوض وادي الحي. (Oued El Hai).

تم اعتماد منهجية تجمع بين المعطيات الجيولوجية والتربوية والهيدرولوجية، إلى جانب التحليل المكاني باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (SIG)، من أجل تحديد التوزيع المكاني لاختلافات النفاذية في التربة. وتساهم النتائج المتوصل إليها في فهم السلوك الهيدرولوجي للمنطقة، وتقييم المخاطر المرتبطة بالتسرب أو الجريان السطحي، كما تقدم توصيات مهمة من أجل تدبير مستدام للموارد المائية والتخطيط المجالي في الحوض المائي المدروس.

## Résumé

Cette étude vise à établir des cartes de l'indice de perméabilité  $k$  et du code  $b$ , deux indicateurs fondamentaux permettant d'évaluer la perméabilité des formations superficielles du sol dans le bassin versant de l'Oued El Hai.

La méthodologie adoptée repose sur l'intégration de données géologiques, pédologiques et hydrologiques, appuyée par une analyse spatiale à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG), afin de caractériser la distribution spatiale des variations de perméabilité des sols.

Les résultats obtenus contribuent à une meilleure compréhension du comportement hydrogéologique de la zone d'étude, à l'évaluation des risques liés à l'infiltration et au ruissellement, et permettent de formuler des recommandations pertinentes en matière de gestion durable des ressources en eau et d'aménagement du territoire au sein du bassin versant concerné

## **Abstract**

This study aims to develop maps of the permeability index  $k$  and the permeability code  $b$ , which are two fundamental indicators used to assess the permeability of superficial soil formations in the Oued El Hai watershed.

The adopted methodology integrates geological, pedological, and hydrological data, combined with spatial analysis using Geographic Information Systems (GIS), in order to determine the spatial distribution of soil permeability variations.

The obtained results contribute to a better understanding of the hydrogeological behavior of the study area, allow for the assessment of risks related to infiltration and surface runoff, and provide valuable recommendations for the sustainable management of water resources and land-use planning within the studied watershed.

## DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :*

- *Mon père et ma mère qui m'ont toujours soutenu durant toutes les périodes de ma vie, que dieu le tout puissant les protègent et les gardent.*
- *À l'âme pure de ma sœur disparue, que Dieu lui accorde Sa miséricorde infinie et que son souvenir vive à jamais dans nos cœurs (WIAM).*
- *À ma petite famille, source de mon bonheur : mon épouse bien-aimée et mes enfants chéris, MennET ELRahman, Taha et Taym*
- *Mes frères ET MES SŒURS.*
- *À Mon ami BENAICHE MOURAD*
- *À mon encadreur Mr : BERGHOUT ALI*
- *À tous les enseignants de faculté de technologie.*
- *À toute la promotion 2025.*
- *Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*
- *À toute LA FAMILLE AOUIDJI.*

*AOUIDJI MOHAMED*



## ***Remerciements***

*Nous tenons à remercier avant tout ALLAH  
le tout puissant nous avoir donné le courage  
et les moyens nécessaires d'accomplir ce  
modeste travail en vue de l'obtention de nos diplômes.*

*Par la même occasion, nous tenons à  
remercier tous ceux qui ont chère et qui ont  
participé de près ou de loin à l'élaboration  
de ce travail assavoir :*

*Notre encadreur : MR, BERGHOUT ALI. qui  
nous beaucoup aide par sa disponibilité  
quotidienne, ses orientations et ses  
Permanent conseils.*

*Tous les membres de jury qui nous feront  
l'honneur d'examiner et de juger notre travail*

*Tous les enseignants de département de  
l'hydraulique à M'SILA qui ont participé à  
notre formation ;*

# Sommaire

	<b>Page</b>
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les classes de perméabilité et de structure</b>	
1.1 Introduction.....	3
1.2.1 Définition de la perméabilité .....	3
1.2-2 -Les bases de la classification de la perméabilité.....	4
1.2.2.1- classification des sols- USDA-NRCS.....	4
1.2.2.1.1 -Les grandes classes de sols (Soil Orders).....	5
1.2.2.1.2 -Les sous-groupes de sols (Soil Suborders).....	6
1.2.2.1.3 -Les familles de sols (Soil Families).....	6
1.2.2.1.4 -Les séries de sols (Soil Series).....	6
1.2.2.1.5-Critères utilisés dans la classification USDA-NRCS.....	6
1.2.2.1.6 -Applications de la classification USDA-NRCS.....	7
1.2.2.2 - CLASSIFICATION DES SOLS- MTQ.....	8
1.3. Classes de structure du sol.....	10
1.3.1. Définition de la structure du sol .....	10
1.3.2- Classification de la structure du sol.....	11
1.3.2.1-La première classification .....	11
1.3.2.1.2-La structure grumeleuse comporte de nombreux avantages .....	11
1.3.2.1.3 -Sols sableux.....	12
1.3.2.1.4 -Sols argileux.....	12
1.3.2.1.5 -Sols limoneux.....	12
1.3.2.1.6-Utilisation dans le domaine d'hydrologie (résistance du sol a l'érosion).....	13
1.3.2.2 -La deuxième classification (ITC).....	13
1.3.2.2.1-Le système évalue trois qualités générales des sols minéraux.....	13
1.3.2.2.2 -La classification des sols de l'ITC repose sur un certain nombre de principes et d'hypothèses, à savoir .....	13
1.4 -Les classe .....	14
1.5 -La troisième classification.....	16
1.6- Conclusion .....	21

## Chapitre 2 : Présentation du milieu de l'étude

2.1. INTRODUCTION .....	22
2.2. Situation géographique .....	22
2.2.1 Réseau hydrographique .....	24
2.3. Les grands ensembles physiques.....	25
2.3.1. Les montagnes.....	25
2.3.2. Les piémonts.....	26
2.3.3. Les plaines.....	26
2.4. La structure du bassin.....	26
2.4.1. Stratigraphie et aperçu lithologique global.....	27
2.5 Les grands ensembles physiques.....	28
2.5.1. Les montagnes.....	28
2.5.2. Les piémonts.....	29
2.5.3. Les plaine.....	29
2.6. La structure du bassin.....	30
2.6.1. Stratigraphie et aperçu lithologique global.....	30
2.7. Caractéristiques lithologiques et perméabilité des roches des bassins versants ....	32
2.7.1. Caractéristiques lithologiques des roches des bassins versants.....	32
2.7.1.1. Formations calcaires et marno-calcaires du Cénomanién-Turonien.....	32
2.7.1.2. Formations gréseuses et marno-calcaires du Miocène.....	32
2.7.1.3. Formations composites : marnes, conglomérats et calcaires.....	33
2.8 Caractéristiques Géographiques Du Bassin Versant.....	33
2.8.1. Les Indices De Pente.....	34
2.9. Le couvert végétal .....	35
2.9.1. Rôle hydrologique du couvert végétal.....	35
2.9.2. Typologie du couvert végétal.....	36
2.9.3. État du couvert végétal dans le bassin versant de l'Oued El Hai.....	36
2.9.4. Carte du couvert végétal: répartition et vulnérabilité.....	37
2.10 La perméabilité.....	38
2.10.1 Les sols.....	40
2.11 Morphométrie.....	41
2.11.1. La Densité De Drainage Dd .....	41
2.11.2. LE TALWEG PRINCIPALE.....	41

2.11.3. Le Temps De Concentration (Tc) .....	42
2.12 .Géologie Des Bassins Versants .....	43
2.13 Conclusion.....	44

**CHAPITRE III- Cartographie du code de perméabilité b et de l'indice de perméabilité K**

3.1 Introduction.....	46
3.2 Méthodologie .....	46
3.2.1 Prétraitement des données dans ArcGIS .....	47
3.2.2 Attribution des codes de perméabilité .....	48
3.2.3 Élaboration de la carte des codes de perméabilité .....	48
3.3 Carte de la perméabilité du sol .....	54
3.4 Conclusion .....	58
Conclusion général.....	59
Références bibliographiques.....	60

## Lite des figures

	Page
Figure N° I- 01 : Triangle de classification texturale des sols et classes de texture du MTQ	9
Figure N° I- 02 : Code Structure basée sur la texture .....	17
Figure N° I- 03 : codes de perméabilité basés sur la classification des textures .....	18
Figure N° I .4 : le triangle textural .....	19
Figure II-1 Localisation géographique et administrative de la zone d'étude .....	24
Figure II-2: Carte de localisation du bassin versant d'Oued El-Hai .....	24
Figure II -3 Lithologie du bassin versant de l'Oud El Hai .....	32
Figure II-4 Carte de la végétation du bassin versant de l'Oued El Hai .....	38
Figure II-5: Carte de la perméabilité de bassin versant d'oued El Hai .....	39
Figure II -6: Profil topographique du talweg principal .....	42
Figure II -7 : Coupe du val d'El-Kantara .....	44
Figure 3.1 : Triangle des textures du sol indiquant les classes texturales selon les proportions d'argile, de limon et de sable .....	49
Figure 3.2 : Carte du limon .....	50
Figure 3.3 : Carte de l'argile .....	50
Figure 3.4 : Carte du sable .....	51
Figure 3.5 : Carte du code B .....	53
Figure 3.6 : Carte de Type du sol .....	57

## Liste des tableaux

	Page
Tableau I - 01 : Matrice d'assignation des groupes hydrologiques .....	7
Tableau I - 2 : Classification hydrologique du MTQ des sols selon la texture du sol en surface .....	8
Tableau I- 03 : Codification de la structure des sols .....	17
Tableau I- 04 : Codification de la perméabilité du sol .....	17
Tableau 2-1 : la perméabilité des formations de la zone d'étude .....	39
Tableau 2-2 : Les valeurs de la densité de drainage .....	41
Tableau 2-3 : Récapitulation des caractéristiques morphométriques du bassin versant .....	43
Tableau 3.2. soil permeability code based on soil texture class.....	52
Tableau 3.3: soil layer for soil series in malaysia .....	52
Tableau 3.4: Codification de la perméabilité du sol ( $b_p$ ) .....	53
Figure 3.5: Algorithme pour la détermination du code de la perméabilité b .....	53
Tableau 3.6: Type de sols .....	55
Tableau 3.7: Algorithme pour l'identification des types de sols .....	56

## **Introduction générale :**

L'étude de la perméabilité des sols constitue un élément fondamental pour comprendre les mécanismes d'infiltration, de ruissellement et de recharge des nappes phréatiques dans un bassin versant. En effet, la perméabilité influence directement la gestion des ressources en eau, la prévention des risques d'érosion et d'inondation, ainsi que le développement des activités agricoles et environnementales.

Le bassin versant de l'Oued El Hai présente une diversité géologique et pédologique importante, ce qui se traduit par une variabilité spatiale notable des caractéristiques hydrauliques des formations superficielles. Dans ce contexte, la cartographie de l'indice k (taux de perméabilité) et du code b (classification des perméabilités) s'avère essentielle pour une meilleure connaissance des propriétés du sol et une gestion optimale des ressources hydriques.

Cette étude vise à réaliser une cartographie détaillée de ces paramètres, en s'appuyant sur des mesures de terrain et des analyses géostatistiques, afin de fournir un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires et les acteurs locaux impliqués dans le développement durable du bassin.

## **Objectif de la recherche :**

L'objectif principal de cette recherche est de cartographier l'indice k et le code b de perméabilité des formations superficielles du sol dans le bassin versant de l'Oued El Hai. Cette cartographie vise à :

- ✓ Identifier la distribution spatiale des différentes classes de perméabilité dans le bassin.
- ✓ -Comprendre l'impact des caractéristiques géologiques et pédologiques sur la perméabilité des sols.
- ✓ -Fournir une base scientifique pour la gestion intégrée des ressources en eau et la planification des aménagements agricoles et environnementaux.

- ✓ -Contribuer à l'évaluation des risques liés au ruissellement, à l'érosion et aux inondations dans la région.

Pour atteindre l'objectif visé, le travail sera divisé suivant le plan ci-dessous :

- **Introduction générale.**
- **Chapitre I : Généralités sur les classes de perméabilité et de structure**
- **Chapitre II : Présentation du milieu de l'étude**
- **Chapitre III : Cartographie du code de perméabilité b et de l'indice de perméabilité K.**
- **Conclusions et recommandations.**

## Chapitre I : Généralités sur les classes de perméabilité et de structure.

### 1.1. INTRODUCTION :

La compréhension des propriétés physiques du sol, notamment sa perméabilité et sa structure, constitue un fondement essentiel dans les domaines de l'hydrologie, de l'agronomie et de la gestion des ressources naturelles. Ces propriétés influencent directement les phénomènes d'infiltration, de ruissellement, d'érosion et de rétention d'eau dans le sol.

Ce chapitre vise à présenter les notions de base relatives aux classes de perméabilité et de structure des sols. Il s'agit tout d'abord de définir les types de perméabilité et de structure (granulaire, massive, prismatique, etc.), puis de décrire les méthodes de classification utilisées dans les études pédologiques et hydrologiques.

Une attention particulière sera accordée aux systèmes de codification (code B pour la perméabilité et code C pour la structure) qui permettent une lecture standardisée des cartes pédologiques et facilitent l'analyse spatiale à l'aide des outils SIG

### 1.2 Classes de perméabilité du sol :

#### 1.2.1 - Définition de la perméabilité :

La perméabilité est une caractéristique physique qui représente la facilité qu'a un matériau à permettre le transfert de fluide au travers d'un réseau connecté.

La **perméabilité** et la **structure** des sols sont des caractéristiques essentielles pour comprendre les processus d'infiltration, de rétention d'eau, et d'écoulement dans le sol. Elles influencent directement l'hydrologie du bassin versant et déterminent comment l'eau se déplace à travers le sol et les formations superficielles. Ces propriétés sont utilisées pour classer les sols en différentes classes de perméabilité et de structure.

La Loi de Darcy permet de relier un débit à un gradient de pression appliqué au fluide grâce à un paramètre caractéristique du milieu traversé : la perméabilité  $k$ .

La loi de Darcy (Henry Darcy, 1856) s'exprime par :

$$\frac{Q}{S} = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

Avec Q le débit,

S la section de l'éprouvette qui pour une éprouvette cylindrique est  $\pi R^2$

R le rayon de l'éprouvette,

$k$  la perméabilité,  $h$  la viscosité dynamique du fluide et  $\Delta P/\Delta x$ , le gradient de pression.

La perméabilité  $k$  est donc :

$$k = \frac{Q}{S} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta P} \cdot \eta$$

$$\frac{\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{Pa}} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{m}^2$$

La perméabilité  $k$  s'exprime en  $\text{m}^2$ . Lorsque les unités suivantes sont utilisées :

$Q$  en  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

$S$  en  $\text{cm}^2$ ,

$\Delta P/\Delta x$  en  $\text{atm} \cdot \text{cm}^{-1}$  et  $h$  en poises,

La perméabilité  $k$  s'exprime également en Darcy. Ainsi, 1 Darcy =  $0,97 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ . Le darcy est couramment utilisé par les hydrogéologues et par les pétroliers. Le  $\text{m}^2$  est plutôt utilisé par les physiciens des matériaux.

La perméabilité peut être considérée comme significative de la surface utilisable pour l'écoulement, elle dépend de la géométrie du réseau poreux.

La loi de Darcy, et donc la perméabilité, est définie pour des conditions d'écoulement laminaire dans un milieu homogène, isotrope et continu ; le fluide n'interagissant pas avec le milieu.

### 1.2-2 -Les bases de la classification de la perméabilité

La perméabilité des sols est mesurée par l'indice **K** (conductivité hydraulique), qui détermine la capacité d'un sol à permettre l'infiltration de l'eau à travers ses pores. La perméabilité varie selon la texture, la structure et l'humidité du sol. En fonction de cette capacité d'infiltration, les sols sont généralement classifiés en plusieurs catégories.

Il existe de nombreux types de classes de perméabilité, les classifications les plus utilisées sont :

#### 1.2.2.1- CLASSIFICATION DES SOLS- USDA-NRCS

Le système de classification des sols de l'USDA (United States Département of Agriculture) et du NRCS (Natural Resources Conservation Service) est largement utilisé pour identifier et classifier les sols en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques, de leur texture, de leur structure, et de leur capacité à soutenir les plantes.

Cette classification repose sur une série de critères, notamment la texture du sol, la profondeur, la capacité de rétention d'eau, la perméabilité et l'acidité, parmi d'autres facteurs.

Le système USDA-NRCS de classification des sols comprend plusieurs groupes et sous-groupes qui permettent une classification détaillée. Voici les principales catégories de la classification des sols selon ce système :

#### 1.2.2.1.1 -Les grandes classes de sols (Soil Orders)

Le système de classification des sols USDA-NRCS repose sur une hiérarchie à plusieurs niveaux, commençant par les orders (ordres) de sols, qui sont les catégories les plus larges. Il existe 12 ordres principaux de sols, classés en fonction de leurs caractéristiques principales, telles que leur formation, leur texture, leur composition chimique et leur comportement hydrique. Voici quelques-uns de ces ordres :

- Alfisols : Sols modérément fertiles, souvent présents dans les zones tempérées. Ils ont une couche argileuse illuviale (horizon Bt).
- Andosols : Sols volcaniques riches en cendres, avec une grande capacité de rétention d'eau.
- Aridosols : Sols désertiques, généralement secs et alcalins, avec des quantités limitées de matière organique.
- Entisols : Sols jeunes, souvent peu développés, présents dans des environnements où le processus de pédogenèse (formation du sol) est peu avancé.
- Gelisols : Sols trouvés dans les régions froides, souvent gelés en permanence ou pendant de longues périodes.
- Histosols : Sols riches en matière organique, souvent présents dans les zones humides ou marécageuses.
- Inceptisols : Sols jeunes avec une légère évolution de la pédogenèse, souvent dans des zones montagneuses.
- Mollisols : Sols noirs riches en matière organique, principalement trouvés dans les prairies, offrant une grande fertilité.
- Oxisols : Sols tropicaux fortement altérés, riches en fer et en aluminium, souvent très acides et peu fertiles.
- Spodosols : Sols acides et sablonneux, typiques des forêts boréales, avec un horizon illuvial riche en fer et aluminium.
- Ultisols : Sols acides et fortement lessivés, souvent présents dans les régions tropicales ou subtropicales.
- Vertisols : Sols argileux expansifs, sujets à de fortes variations de volume entre l'humidité sèche et humide, fréquents dans les régions semi-arides.

### 1.2.2.1.2 -Les sous-groupes de sols (Soil Suborders)

Chaque ordre de sol est subdivisé en sous-groupes, qui décrivent davantage les propriétés du sol en fonction de caractéristiques spécifiques, telles que la texture, le drainage, ou la présence de certaines couches spécifiques. Par exemple, les Alfisols peuvent être subdivisés en sous-groupes en fonction du type de végétation, de la profondeur du sol ou des conditions hydrologiques.

### 1.2.2.1.3 -Les familles de sols (Soil Families)

Au niveau suivant de la hiérarchie de classification se trouvent les familles de sols, qui prennent en compte des caractéristiques plus spécifiques, telles que la texture du sol, la profondeur de l'horizon, la température et l'humidité du sol. Par exemple, dans une famille de sols, on peut trouver des sols argileux, sablonneux ou limoneux, ce qui affecte leur capacité à retenir l'eau et leur fertilité.

### 1.2.2.1.4 -Les séries de sols (Soil Series)

Les séries de sols représentent le niveau le plus détaillé de la classification des sols. Elles sont définies par des caractéristiques spécifiques à un sol donné, comme sa texture, sa structure, sa couleur, et sa profondeur. Une série de sol peut désigner un type de sol particulier trouvé dans une région donnée, comme le "Miami Soil" ou le "Hagerstown Soil". Ces séries de sols peuvent être utilisées pour la gestion des sols agricoles et des ressources en eau.

### 1.2.2.1.5-Critères utilisés dans la classification USDA-NRCS

Le système de classification des sols de l'USDA-NRCS repose sur une série de critères qui permettent de différencier les sols. Voici les principaux critères utilisés :

- **Texture du sol** : La proportion de sable, de limon et d'argile, qui détermine la capacité du sol à retenir l'eau et à drainer.
- **Structure du sol** : L'agencement des particules de sol et des agrégats, ce qui affecte la perméabilité et l'infiltration de l'eau.
- **Profondeur du sol** : La profondeur de l'horizon cultivable, qui affecte la quantité d'eau et de nutriments que le sol peut stocker.
- **Couleur du sol** : Indique la présence de minéraux, de matières organiques et d'humidité dans le sol.
- **pH du sol** : Indique l'acidité ou l'alcalinité du sol, ce qui influence la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes.
- **Capacité de rétention d'eau** : La capacité du sol à retenir l'humidité, ce qui est essentiel pour les cultures agricoles et la gestion des ressources en eau.

- **Présence de minéraux** : Les sols peuvent contenir des minéraux spécifiques qui influencent leur fertilité et leur utilisation agricole.

**1.2.2.1.6 - Applications de la classification USDA-NRCS**

Cette classification des sols est utilisée pour plusieurs objectifs :

- Gestion des ressources en eau : La connaissance de la perméabilité et de la capacité de rétention d'eau des sols est essentielle pour la gestion des bassins versants et la prévention des risques d'inondations ou de sécheresse.
- Agriculture : En classifiant les sols, les agriculteurs peuvent déterminer quel type de culture est le mieux adapté à un sol donné et améliorer la gestion de l'irrigation et de la fertilisation.
- Aménagement du territoire : La classification des sols aide à prendre des décisions éclairées en matière d'urbanisme, d'aménagement des infrastructures et de protection des ressources naturelles.
- Conservation des sols : Elle permet également de mettre en place des stratégies de conservation adaptées aux types de sols pour prévenir l'érosion et améliorer la fertilité.

**Tableau I - 01 : Matrice d'assignation des groupes hydrologiques (USDA - NRCS, 2009)**

Profondeur de sol perméable 1	Profondeur de la nappe 2	K <sub>sat</sub> de l'horizon le moins perméable	Zone de K <sub>sat</sub>	Groupe Hydrologique 3
< 50 cm	-	-	-	D
50 à 100 cm	< 60 cm	> 14,4 cm/h	0 - 50 cm	A / D
		3,6 - 14,4 cm/h	0 - 50 cm	B / D
		0,35 - 3,6 cm/h	0 - 50 cm	C / D
		< 0,35 cm/h	0 - 50 cm	D
	> 60 cm	> 14,4 cm/h	0 - 50 cm	A
		3,6 - 14,4 cm/h	0 - 50 cm	B
		0,35 - 3,6 cm/h	0 - 50 cm	C
		< 0,35 cm/h	0 - 50 cm	D
> 100 cm	< 60 cm	> 3,6 cm/h	0 - 100 cm	A / D
		1,45 - 3,6 cm/h	0 - 100 cm	B / D
		0,15 - 1,45 cm/h	0 - 100 cm	C / D
		< 0,15 cm/h	0 - 100 cm	D
	> 60 cm	> 14,4 cm/h	0 - 50 cm	A
		3,6 - 14,4 cm/h	0 - 50 cm	B
		0,35 - 3,6 cm/h	0 - 50 cm	C
		< 0,35 cm/h	0 - 50 cm	D
> 100 cm	> 3,6 cm/h	0 - 100 cm	A	
	1,45 - 3,6 cm/h	0 - 100 cm	B	
	0,15 - 1,45 cm/h	0 - 100 cm	C	
	< 0,15 cm/h	0 - 100 cm	D	

1 - Un horizon est considéré imperméable lorsque  $K_{sat} < 0,0035$  cm/h ou que cet horizon est une couche indurée, un horizon cimenté ou du roc.

2 - Une nappe présente pendant n'importe laquelle période de l'année.

3 - La classification double est utilisée seulement pour les sols avec une nappe dans les 60 premiers cm de sol. Lorsque ces sols sont adéquatement drainés, un groupe basé sur  $K_{sat}$  est aussi assigné.

### **1.2.2.2 - CLASSIFICATION DES SOLS- MTQ**

Le système de classification des sols du MTQ (Le Ministère des Transports du Québec) est essentiel pour les projets d'ingénierie et de construction au Québec. Il permet d'identifier les caractéristiques spécifiques des sols afin de déterminer les meilleures méthodes de construction, de gestion des eaux et d'aménagement du territoire. Cette classification aide à garantir la stabilité et la durabilité des infrastructures, tout en prenant en compte les particularités de chaque type de sol.

Il effectue la classification hydrologique des sols à l'aide des cartes pédologiques, des cartes des dépôts meubles et des cartes des dépôts de surface. La classification à l'aide des cartes pédologiques est privilégiée et elle est présentée ici. Les sols sont classifiés en cinq classes hydrologiques (AB, B, BC, C, CD) selon la texture des 15 premiers centimètres de sol. La classification se fait à l'aide de la figure 48 et du tableau 19. Plus de 800 séries de sols du Québec sont classifiées selon ce système et présentées à l'annexe A- 3 à A- 12 du document du MTQ (2004).

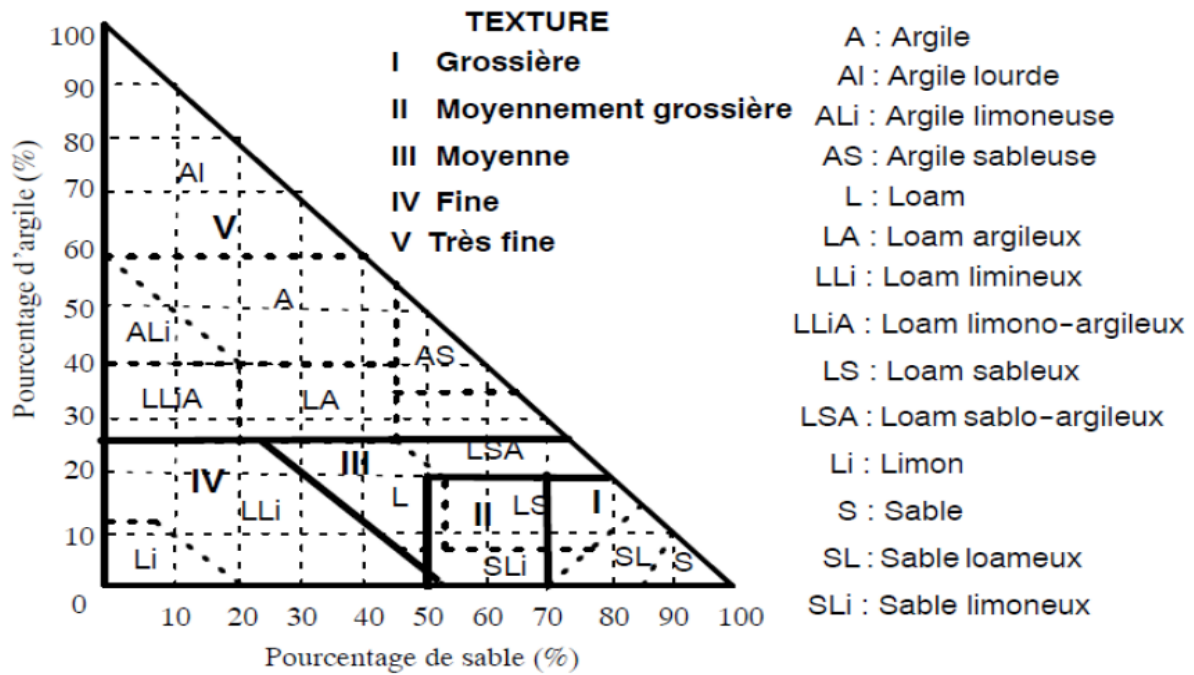


Figure N° I- 01 : Triangle de classification texturale des sols et classes de texture du MTQ (2004).

Tableau I - 2 : Classification hydrologique du MTQ des sols selon la texture du sol en surface (MTQ, 2004)

Classe	Texture	Groupe
1.0	<b>Texture de sol à prédominance grossière</b>	AB
1.1	Gravier, sable et certains loams <sup>1</sup> grossiers avec un bon drainage	B
1.2	Mince <sup>2</sup> couche de gravier, sable et certains loams sableux sur argile ou sur roc	
2.0	<b>Texture de sol à prédominance moyennement grossière</b>	
2.1	Loam moyennement grossier, épais <sup>3</sup> qualifié de graveleux, schisteux et cherteux	AB
2.2	Loam moyennement grossier, épais ou mince couche sur roche ou sur argile	B
3.0	<b>Texture de sol à prédominance moyenne</b>	
3.1	Mince couche de loam moyen sur roc	B
3.2	Loam moyen épais qualifié de graveleux, schisteux ou cherteux	B
3.3	Loam moyen épais avec drainage <sup>4</sup> de bon à imparfait	B
3.4	Loam moyen épais avec mauvais drainage	BC
3.5	Loam moyen mince sur argile	BC
4.0	<b>Texture de sol à prédominance fine</b>	
4.1	Loam limoneux et loam fin avec drainage de bon à imparfait	BC
4.2	Loam limoneux et loam fin avec drainage mauvais	C
5.0	<b>Texture de sol à prédominance très fine</b>	C
5.1	Argile, loam argileux, loam argileux- limoneux, argile limoneuse	CD
5.2	Argile lourde	

1 - Parfois le terme «loam» est remplacé par «terre franche» et «limon»; il existe une certaine équivalence texturale entre les termes, mais il serait avantageux de classifier précisément le sol à l'aide de ses pourcentages de sable et d'argile et du graphique de la classification texturale des sols.

2 - «Mince» : sol organique ou minéral de moins de 500 mm d'épaisseur reposant sur le roc.

3 - «Épais» : sol organique ou minéral de plus de 500 mm d'épaisseur reposant sur le roc.

4 - «drainage» est pris ici dans le sens pédologique du terme, c'est-à-dire : bon drainage : bonne infiltration dans le sol

### **1.3. Classes de structure du sol :**

#### **1.3.1. Définition de la structure du sol :**

Est un état du sol vivant à court terme. C'est le mode d'agencement des différents agrégats du sol. C'est derniers résultants de l'assemblage des particules entre-elle. En fonction de la présence ou non présence des agrégats, il y a deux (2) types de structures :

- Une structure avec agrégats dite fragmentaire et qui peut être arrondie, anguleuse ou feuilletés.
- Une structure sans agrégats dite continue (cours pédologie, 2004).

La formation de la structure du sol résulte principalement de perturbations physiques d'origine anthropique ou climatique (OADES, 1993 ; EL TITI, 2003). Les pores créés par ces perturbations sont généralement allongés ; ce sont les fissures. L'activité biologique des organismes du sol participe aussi à la formation de la structure mais joue surtout un rôle majeur dans sa stabilisation. La dégradation de la structure résulte quant à elle de l'action de l'homme ou du climat (YOUNG et al. 1998). Dans les systèmes labourés, la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol tandis que dans les systèmes non travaillés (semis direct) la structure est principalement créée par l'action du climat (en surface dans les régions tempérées) et par des processus biologiques (OORTS, 2006). D'une manière générale, dans les milieux à structure continue, les racines sont peu nombreuses, droites et présentent un aspect filiforme. Au contraire, dans les sols à structure construite, elles sont

sinueuses, ramifiées et garnies de nombreux poils absorbants (HENIN, et al, 1969; CALLOT et al, 1981).

### **1.3.2- Classification de la structure du sol**

Il existe plusieurs classifications du sol; elles sont basées principalement sur sa structure.

#### **1.3.2.1-La première classification :**

Utilisé dans l'agriculture est basée sur la structure du sol ; sur le climat et sur l'occupation du sol :

- La structure du sol est liée à sa texture, au climat, à son activité biologique, aux pratiques culturales, dont le travail du sol, la rotation des cultures et les manières d'utiliser la machinerie. On peut classer les sols selon qu'ils sont sans structure, ou qu'ils présentent une structure sphérique, angulaire, ou lamellaire.
- La structure d'un sol fait référence à la façon dont les particules de sable, de limon et d'argile sont disposées les unes par rapport aux autres

Dans un sol bien structuré, les particules de sable et de limon sont liées en agrégats (petites mottes) par l'argile, l'humus et le calcium. Les grands espaces vides entre les agrégats (macropores) permettent à l'eau et à l'air de circuler et aux racines de s'enfoncer dans le sol. Les petits espaces vides (micropores) retiennent quant à eux l'eau dont les plantes ont besoin. Cette structure « idéale » est appelée structure grumeleuse.

#### **1.3.2.1.2-La structure grumeleuse comporte de nombreux avantages :**

- Une bonne rétention de l'eau et des éléments nutritifs;
- Un bon drainage;
- Une bonne aération;
- Un bon développement du système racinaire des végétaux;
- Un travail facile du sol;
- Un réchauffement rapide du sol au printemps;
- Une bonne activité biologique du sol;
- Une bonne résistance à l'érosion et à la compaction.

Les sols argileux, sableux et limoneux présentent rarement une structure idéale.

On peut toutefois les améliorer en incorporant des amendements.

### 1.3.2.1.3 -Sols sableux

On améliore la structure des sols sableux en les amendant régulièrement avec de la matière organique sous forme de compost ou de fumier composté. Il est préférable d'incorporer ces amendements au début du printemps, car le travail des sols sableux à l'automne favorise leur érosion. Également, dans ces sols, l'ajout de basalte est un élément qui contribue à améliorer la rétention d'eau et de minéraux.

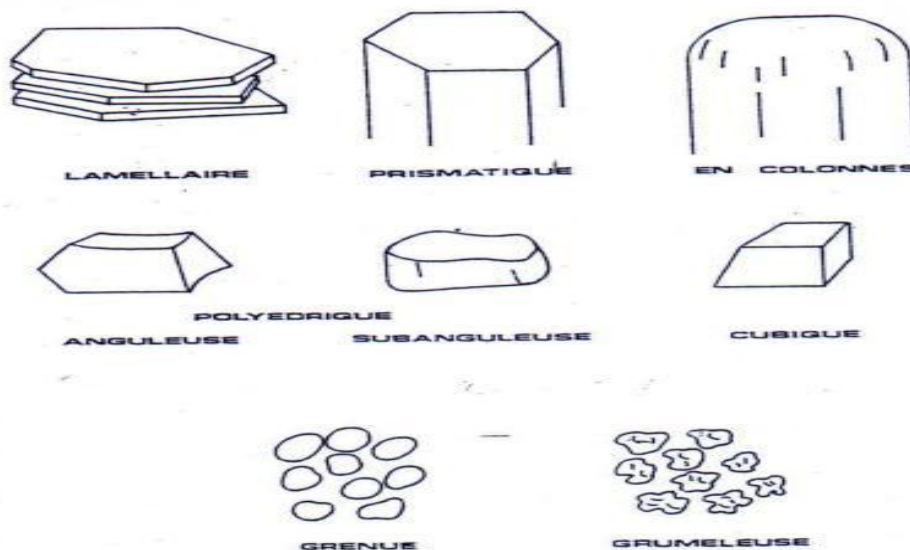
### 1.3.2.1.4 -Sols argileux

On améliore la structure des sols argileux par des apports en matières organiques sous forme de compost ou de fumier composté. Ces amendements sont préférablement incorporés à la fin de l'automne. Les sols argileux mal drainés peuvent aussi être amendés avec une terre sableuse.

Certains sols argileux sont très riches en sodium, ce qui nuit à l'agrégation des particules minérales. Il est possible d'améliorer la structure de ces argiles sodiques en y incorporant du gypse (si leur pH est neutre ou alcalin) ou de la chaux (si leur pH est acide).

### 1.3.2.1.5 -Sols limoneux

On améliore le drainage et l'aération des sols limoneux par des apports importants de matières organiques, sous forme de compost ou de fumier composté. Il est préférable d'incorporer ces amendements à la fin de l'automne.



**1.3.2.1.6-Utilisation dans le domaine d'hydrologie (résistance du sol à l'érosion)**

L'Inventaire des terres du Canada (ITC) classe les terres selon leur potentiel agricole au moyen d'un système interprétatif qui évalue l'influence limitative exercée par diverses caractéristiques de sol et de climat sur l'aptitude des terres à la production des grandes cultures communes. En Ontario, les grandes cultures communes sont le maïs, le soja, les céréales à paille et les espèces fourragères vivaces. Ce système de classification des terres ne tient pas compte de l'aptitude à la culture d'espèces horticoles ou d'autres cultures de spécialité.

**1.3.2.2 -La deuxième classification (ITC) :**

"*Land Inventory, Soil Capability Classification for Agriculture*" utilisée par les services agricoles de Canada est basée sur leur potentiel agricole au moyen d'un système interprétatif qui évalue l'influence limitative exercée par diverses caractéristiques de sol et de climat sur l'aptitude des terres à la production des grandes cultures communes. En Ontario, les grandes cultures communes sont le maïs, le soja, les céréales à paille et les espèces fourragères vivaces. Ce système de classification des terres ne tient pas compte de l'aptitude à la culture d'espèces horticoles ou d'autres cultures de spécialité.

**1.3.2.2.1-Le système évalue trois qualités générales des sols minéraux :**

1. Leur productivité, comparativement à celle de tous les sols minéraux de l'Ontario et du Canada.
2. Leur potentiel de diversification, c'est-à-dire la gamme des grandes cultures communes qu'on peut y cultiver.
3. Leurs besoins en pratiques de gestion, à savoir les améliorations foncières et les pratiques de conservation qui sont nécessaires pour améliorer l'aptitude à porter des grandes cultures.

**1.3.2.2.2 -La classification des sols de l'ITC repose sur un certain nombre de principes et d'hypothèses, à savoir :**

1. On tient compte des associations de caractéristiques pédoclimatiques qui ont un effet limitatif sur la gamme des grandes cultures communes cultivables et sur la capacité productive des sols. Dans le cas des terres qui sont susceptibles d'être améliorées par des travaux de débroussaillage, d'arrachage d'arbres et de dessouchage, ce besoin

d'amélioration n'est pas considéré comme un facteur limitant le potentiel agricole, sauf si ces travaux ne sont pas économiquement envisageables.

2. On suppose que la gestion des terres et la production des grandes cultures font l'objet des meilleures pratiques contemporaines.
3. On considère que les différentes terres rangées dans une même classe de possibilités sont affectées du même degré de limitation, en dépit de la diversité des limitations dont elles font individuellement l'objet.
4. Les classes de possibilités traduisent les capacités potentielles des terres après amélioration foncière. Les terres nécessitant des travaux d'amélioration (comme l'épierreage ou le drainage souterrain) qui sont réalisables d'un point de vue économique et pratique par l'exploitant ou le propriétaire sont classées en fonction du degré de limitation qui demeurerait après réalisation des travaux. Il est admis qu'à certains endroits ou dans certaines conditions locales, certaines améliorations peuvent ne pas être réalisables même si elles le sont généralement sur des terres comparables situées à d'autres endroits.
5. Les sols d'une zone donnée peuvent voir leur classement modifié après réalisation de travaux d'amélioration majeurs ayant réduit ou éliminé de façon permanente les limitations présentes.
6. La distance par rapport aux marchés, l'état des routes, le lieu, la taille des exploitations agricoles, les régimes de propriété et de mise en valeur des terres, les techniques culturales et la compétence ou les ressources des différents exploitants ne sont pas des critères utilisés dans la classification des sols de l'ITC.
7. Les classes de possibilités peuvent être modifiées à mesure qu'évoluent les connaissances sur le comportement et les réactions des sols.

#### **1.4 -Les classes :**

##### **Classe 1 – Sols ne présentant aucune limitation importante à la production agricole.**

Les sols de classe 1 sont plats ou presque plats, profonds, bien drainés à imparfaitement drainés, et possèdent un bon niveau de fertilité naturelle ainsi qu'une bonne capacité de rétention des éléments nutritifs et de l'eau. Ils peuvent être travaillés et cultivés sans difficulté. Quand ils sont bien gérés, ils conviennent à la production de la gamme complète des grandes cultures communes avec une productivité assez élevée à élevée.

**Classe 2 – Sols présentant des limitations modérées qui restreignent la gamme des cultures ou qui exigent l'application de pratiques de conservation ordinaires.**

Ce sont des sols profonds qui peuvent ne pas posséder une aussi bonne capacité de rétention en eau et des éléments nutritifs que les sols de classe 1. Ils souffrent de limitations modérées et peuvent être gérés et cultivés sans difficulté notable. Moyennant une bonne gestion, ils ont une productivité allant d'assez élevée à élevée pour ce qui concerne la plupart des grandes cultures communes.

**Classe 3 – Sols présentant des limitations assez sérieuses qui restreignent la gamme des cultures ou qui exigent des pratiques de conservation spéciales.**

Leurs limitations sont plus graves que celles des sols de classe 2. Elles créent des contraintes sur un ou plusieurs des aspects suivants : choix du moment et facilité du travail du sol; semis et récolte; gamme de cultures possibles; méthodes de conservation. Moyennant une bonne gestion, ces sols peuvent porter la plupart des grandes cultures communes et afficher une productivité assez bonne à assez élevée.

**Classe 4 - Sols présentant de graves limitations qui restreignent la gamme des cultures ou qui exigent des pratiques de conservation spéciales ou une gestion très minutieuse, ou les deux.**

Ils souffrent de limitations graves qui créent des contraintes sérieuses sur une ou plusieurs des pratiques suivantes : choix du moment et facilité du travail du sol; semis et récolte; gamme de cultures possibles; méthodes de conservation. La gamme des grandes cultures communes qui peuvent y être cultivées va de restreinte à large, avec une productivité allant de faible à moyenne, mais la productivité peut être meilleure avec une culture spécialement adaptée.

**Classe 5 – Sols présentant de très sérieuses limitations qui les restreignent à la culture de plantes fourragères vivaces, mais pouvant faire l'objet de pratiques améliorantes.**

L'importance de ces limitations est telle qu'elle rend impossible la production soutenue des grandes cultures annuelles. Ces sols peuvent cependant convenir à la production d'espèces indigènes ou adaptées de plantes fourragères vivaces et ils peuvent être bonifiés par des travaux aratoires. Les travaux d'amélioration réalisables d'un point de vue économique

peuvent être le débroussaillage, le travail du sol, le semis, la fertilisation ou l'assainissement (lutte contre l'excès d'eau).

### **Classe 6 – Sols impropres à la culture, mais pouvant être exploités comme pâture permanente non améliorée.**

Ces sols peuvent supporter le pâturage soutenu d'animaux d'élevage, mais leurs limitations sont si graves qu'elles rendent impossibles l'amélioration par travaux aratoires. Leur relief prononcé peut empêcher l'utilisation des machines agricoles, les sols peuvent ne pas répondre à l'amélioration, ou la saison de pâturage peut être très courte.

### **Classe 7 – Sols impropres à la culture et au pâturage permanent.**

Cette classe regroupe les marais, les terrains rocheux et les sols en pente raide.

## **1.5 -La troisième classification :**

utilisé dans le l'hydrologie et plus précisément en hydro-sédimentologie dans le calcul du facteur d'érodibilité du sol est basée sur la structure du sol; sur le climat et sur l'occupation du sol:

Le facteur d'érodibilité (K) d'un sol exprime sa sensibilité à l'érosion hydrique et dépend de ses propriétés intrinsèques à savoir sa texture, sa structure et sa perméabilité. Il se détermine pour un sol donné par la relation de WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978) :

$$100K = 2.1M^{1.14} * 10^{-4}(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)$$

Où M est calculé par la formule

$$M = (\% \text{ sable fin} + \% \text{ limon}) \times (100 - \% \text{ argile}) ;$$

a : est le pourcentage de matière organique ;

b : est le code de la perméabilité ;

c : est le code de la structure.

Les codes b et c sont déterminés à partir des abaques I-02 et I-03.

Tableau N° I- 03 : Codification de la structure des sols ( $c_s$ )(Wischmeier et Smith,1978)

Nature de la structure	Code de la structure $C_s$
Très structuré ou particulaire	1
Assez structuré	2
Peu structuré	3
Non structuré	4

Tableau N° I- 04 : Codification de la perméabilité du sol ( $b_p$ )(Wischmeier et Smith, 1978)

Degré de perméabilité	Code de perméabilité $b_p$
Rapide	1
Modérée à rapide	2
Modérée	3
Modérée à lente	4
Lente	5
Très lente	6

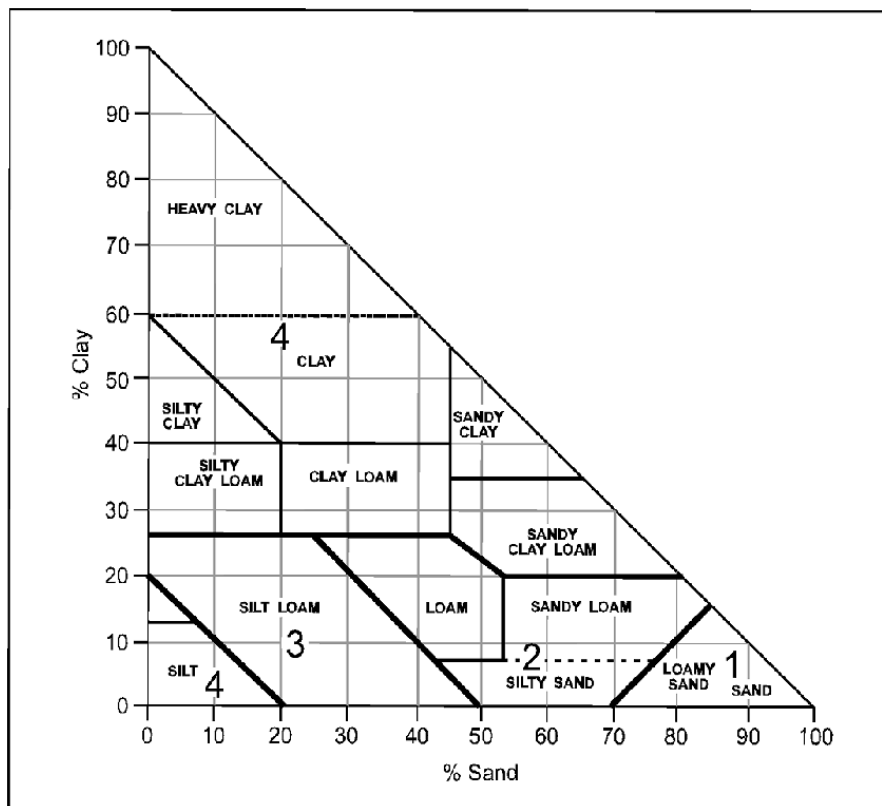


Figure N° I- 02 : Code Structure basée sur la texture (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

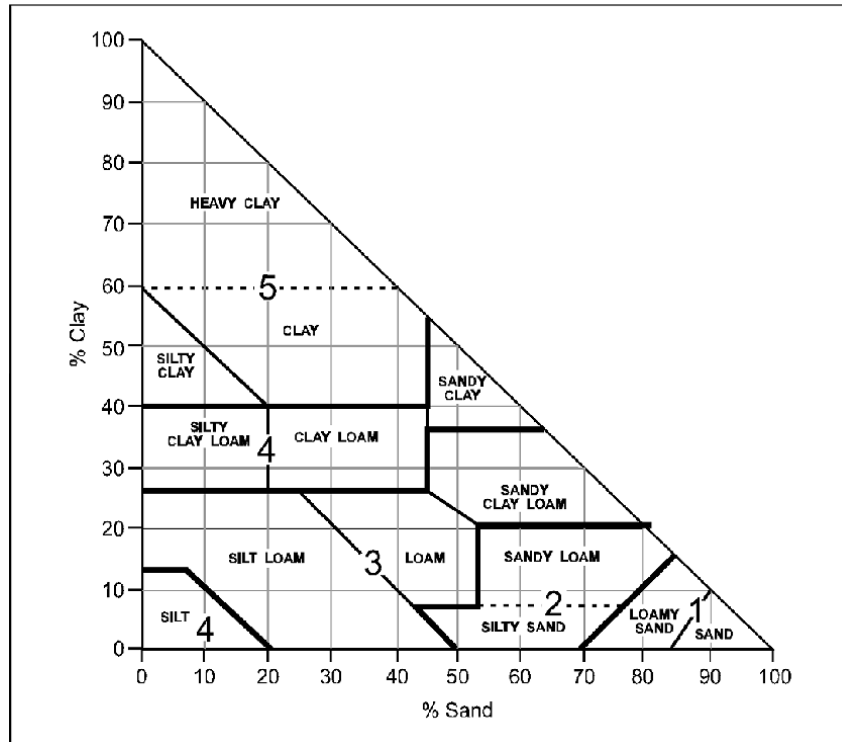


Figure N° I- 03 : codes de perméabilité basés sur la classification des textures (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

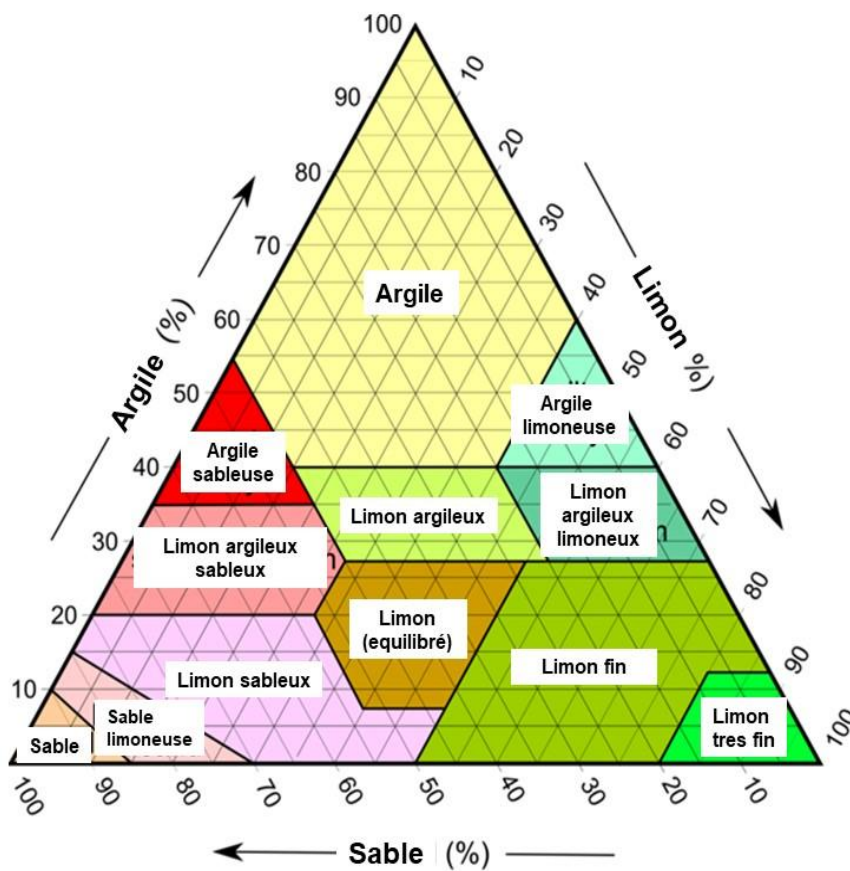


Figure N° I.4 : le triangle textural

Ce schéma représente le triangle textural, un outil scientifique utilisé pour classer les types de sols en fonction des proportions de trois composants principaux :

- **Argile (Argile).**
- **Limon ou limon fin (Limon).**
- **Sable (Sable).**
- ✓ **Composants du sol :**

Les trois côtés du triangle représentent les pourcentages respectifs d'argile, de limon et de sable.

La somme des trois proportions doit toujours être de 100 %.

Chaque point à l'intérieur du triangle correspond à une combinaison différente des trois éléments.

Chaque côté a une direction spécifique de lecture :

- Le pourcentage d'argile est lu le long de lignes horizontales ascendantes (de gauche à droite vers le haut).
- Le pourcentage de sable est lu de droite à gauche.
- Le pourcentage de limon est lu de haut en bas.

❖ **Catégories texturales des sols :**

Selon l'emplacement de la combinaison dans le triangle, le sol est classé comme :

- Limon équilibré (Limon équilibré) : proportions proches entre les trois constituants.
- Argile (Argile) : forte teneur en argile.
- Sable (Sable) : prédominance de sable.
- Limon très fin (Limon très fin) : forte teneur en limon.

Autres exemples : Argile limoneuse, Limon sablo-argileux, Limon fin, etc.

**1.6- Conclusion :**

Ce premier chapitre a permis de poser les bases conceptuelles essentielles à la compréhension des classes de perméabilité et de structure. À travers la présentation des différents types de perméabilité (verticale et horizontale) ainsi que des structures du sol, nous avons mis en évidence leur rôle fondamental dans les processus hydrogéologiques, l'infiltration de l'eau et la circulation souterraine. L'approche de classification adoptée, fondée sur des critères physiques et géotechniques, offre un cadre rigoureux pour l'évaluation des formations superficielles. Ces notions sont indispensables pour la cartographie thématique et pour toute étude visant une meilleure gestion des ressources en eau, la prévention de l'érosion ou l'aménagement du territoire. Le chapitre suivant s'appuiera sur ces acquis pour détailler les méthodes de codification et d'attribution des classes sur le terrain

## Chapitre 2 : Présentation du milieu de l'étude

### 2.1. INTRODUCTION :

La géologie constitue un pilier fondamental dans les études hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques, tout comme le couvert végétal joue un rôle déterminant dans la dynamique hydrique. Des facteurs tels que la lithologie, la tectonique et la structure géologique influencent directement les mécanismes d'écoulement des eaux, qu'il s'agisse d'infiltration souterraine ou de ruissellement en surface. Dans le cadre de l'analyse d'un bassin versant, l'étude géologique permet notamment d'évaluer la perméabilité des formations rocheuses, un paramètre clé qui conditionne la vitesse et le volume des crues, ainsi que l'intensité de l'érosion hydrique.

Cette compréhension est indispensable pour modéliser correctement le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued El Hai, ainsi que pour anticiper les processus d'envasement au niveau du barrage des Fontaines des Gazelles. Selon Dunne et Leopold (1978), la structure géologique et la perméabilité des sols sont des facteurs déterminants dans le régime hydrologique d'un bassin versant.

### 2.2. Situation géographique

Le sous-bassin de l'Oued El-Hai, intégré dans le système hydrographique du Chott Melrhir, couvre une superficie d'environ 1120 km<sup>2</sup>. Ce territoire présente une grande diversité géologique et hydrologique, ce qui influence de manière significative la dynamique des écosystèmes aquatiques de la région (Saha et al., 2020). Il est délimité au nord par les daïras de Batna et Merouana, au sud par la wilaya de Biskra, à l'ouest par les daïras de N'Gaous et Barika, et à l'est par Tazoult, Arris et Menaâ.

Le bassin prend sa source dans les reliefs des monts de Batna, avant de se déverser dans la plaine de l'Outaya, alimentant principalement le barrage des Fontaines des Gazelles (situé à 35°7.4' Nord - 5°34.7' Est) via un réseau hydrographique dominé par l'Oued El-Hai. La région se distingue par des chaînes montagneuses de moyenne altitude, culminant à 2091 mètres dans les monts de Belezma. L'Oued El-Hai, l'un des cours d'eau les plus importants de la région, prend naissance dans l'Oued Tilatou, qui descend des flancs des monts de Belezma, avant de devenir l'Oued El-Hai après sa confluence avec l'Oued Fedhala. Ce

système hydrographique constitue un élément clé de la dynamique hydrologique locale. Les versants entourant l'Oued El-Hai présentent un contraste marqué. Les versants nord, recouverts de forêts denses, offrent une plus grande stabilité et une meilleure protection contre l'érosion, tandis que les versants sud se caractérisent par leur aridité, leur aspect rocheux et la présence de débris. Ce contraste dans la couverture végétale a un impact direct sur l'érosion des sols et la disponibilité en eau, soulignant l'importance de ces caractéristiques pour comprendre les écosystèmes locaux (**Auzet, 1987**).

Géographiquement, le bassin est situé entre les longitudes 5°28' et 6°14' Est, et les latitudes 35°09' et 35°37' Nord. Outre son rôle hydrologique central dans le drainage et le transport des eaux de pluie, l'Oued El-Hai alimente également le barrage des Fontaines des Gazelles, qui joue un rôle stratégique essentiel dans la gestion des ressources en eau de la région (**Makhoukh et al., 2011**).

La délimitation de la zone d'étude, en termes de coordonnées géographiques, est déterminée à partir de la carte topographique de Batna et Barika à l'échelle **1/200.000** :

- Latitude : 35° 5' 53" et 35° 35' 21" Nord
- Longitude : 5° 30' et 6° 17' 36" Est.

Sur le plan administratif, cette zone s'étend sur deux wilayas : Batna, avec une superficie de 1314 km<sup>2</sup>, et Biskra, avec environ 431.297 km<sup>2</sup>, portant ainsi la superficie totale de la zone d'étude à environ **1745.297 km<sup>2</sup>**. **Figure II.1**



Le talweg principal est alimenté par plusieurs affluents en particulier Oued Tilatou ; qui alimentent par les versants Djebel Ich Ali et Djebel Tuggurt par Oued Châaba et Oued Elbiar ; ensuite Oued Laksour ; qui traversent la plaine et la ville de Ain Touta.

La partie Nord-Est ; Amont de Oued Fedhala caractérisé par des affluents alimentés par des sources naturels ; comme Oued Bouaioun et Oued Tafrenet. Par contre la partie Aval ; où les affluents sont à écoulement périodique surtout pendant les averses, parmi les principaux affluents ; Oued Hassi ben tamtam ; Oued Elmelah ; Oued Agroum et Oued Boubiada ; qui traverse la ville d'Elkantara.

En général le réseau hydrographique de Oued El-Hai, dans sa plus grande partie est caractérisé par un écoulement périodique durant les saisons pluvieuses.

### **2.3. Les grands ensembles physiques**

Le bassin versant de l'Oued El-Hai présente une grande diversité de milieux naturels, chacun influençant directement la dynamique hydrologique de la région. Cette diversité peut être subdivisée en trois grands types de milieux physiques : les montagnes, les piémonts et les plaines.

#### **2.3.1. Les montagnes**

Les montagnes dominent la zone nord du bassin versant de l'Oued El-Hai et sont principalement constituées des massifs montagneux des Aurès. Parmi les montagnes notables, on trouve les monts **d'Asker (1833 m)**, le Djebel **Ich Ali (1815 m)** et la chaîne de Belezma, dont le point culminant atteint 2091 m, représentant ainsi l'altitude la plus élevée de la région. Au sud-ouest du bassin, le Djebel **Metlili (1496 m)** fait également partie de cette chaîne montagneuse.

Ces reliefs, orientés d'ouest en est, présentent des altitudes progressives et forment une barrière naturelle ayant un impact significatif sur le climat et l'hydrologie de la région. Sur le plan climatique, ces montagnes influencent les précipitations, les températures et les vents, créant un contraste entre les versants nord, généralement plus humides, et les versants sud, plus arides.

D'un point de vue hydrologique, ces montagnes jouent un rôle primordial en captant les eaux de pluie et en alimentant les cours d'eau du bassin, notamment l'Oued El-Hai. Elles contribuent également au ruissellement et à la recharge des nappes phréatiques, agissant ainsi

comme des réservoirs naturels d'eau et favorisant l'écoulement des eaux vers les plaines environnantes (**Auzet, 1987; Wischmeier & Smith, 1978**).

### **2.3.2. Les piémonts**

Les piémonts représentent une zone de transition géomorphologique stratégique entre les reliefs montagneux du bassin versant de l'Oued El-Hai et les plaines adjacentes. Disposés principalement selon un axe est-ouest, avec une extension méridionale marquée, ces secteurs se caractérisent par une alternance de collines douces et de surfaces planes inclinées. Les altitudes y oscillent entre 1200 et 1600 mètres, conférant à la région une morphologie modérée qui influence divers processus naturels, notamment l'écoulement des eaux. Sur le plan hydrologique, les piémonts assurent la collecte et la transmission des eaux de ruissellement issues des versants montagneux vers les plaines, jouant ainsi un rôle de relais hydrique fondamental. Leur couverture pédologique relativement fertile et leur pente modérée en font également des espaces favorables aux activités agricoles. De surcroît, ces zones agissent comme des interfaces fonctionnelles entre les milieux montagnards et les zones de basse altitude, contribuant à la régulation des flux hydrologiques et à la diversité écologique de l'ensemble du bassin (**Makhoukh et al., 2011**).

### **2.3.3. Les plaines**

Les plaines constituent la portion la plus plane du bassin versant de l'Oued El-Hai, localisée au sud-ouest des piémonts. Leur altitude varie généralement entre 800 et 1200 mètres, selon les courbes de niveau. Formées principalement de dépôts alluviaux tels que les sables, les graviers et les limons, ces plaines résultent des accumulations successives de sédiments déposés par les crues périodiques des oueds.

Grâce à la texture fine et à la capacité de rétention d'eau de leurs sols, ces zones sont particulièrement propices aux activités agricoles, notamment saisonnières.

Les apports alluviaux lors des inondations améliorent la fertilité des sols par l'enrichissement en éléments nutritifs, ce qui se traduit par une productivité élevée. Toutefois, ces bénéfices sont contrebalancés par les risques d'inondations récurrents, qui exigent la mise en place de mesures de gestion hydraulique efficaces.

Ainsi, bien que les plaines jouent un rôle fondamental dans la dynamique agricole et socioéconomique de la région, leur vulnérabilité face aux aléas hydrologiques impose une gestion durable, intégrée et préventive (**Soutter, 2007 ; Makhoukh et al., 2011**).

## **2.4. La structure du bassin**

La configuration topographique variée du bassin versant de l'Oued El-Hai découle en grande partie de son histoire géologique et tectonique. Les mouvements tectoniques anciens ont entraîné à la fois le soulèvement des reliefs et l'effondrement de certaines zones, donnant naissance à une topographie contrastée. Ces déformations structurales influencent profondément le fonctionnement hydrologique du bassin ainsi que les processus de transport sédimentaire et d'érosion.

Le bassin présente une organisation géologique marquée par des plis anticlinaux et synclinaux orientés principalement selon un axe nord-est/sud-ouest, témoignant d'une activité tectonique soutenue.

Cette structuration est le reflet d'une dynamique géodynamique intense, qui a contribué à modeler le paysage actuel au fil du temps. Comme le souligne Laffitte (1939), les forces internes de la Terre ont joué un rôle décisif dans la mise en place du relief régional. Ainsi, la structure tectonique du bassin n'est pas seulement à l'origine de sa morphologie, mais conditionne également les flux hydriques et les zones d'accumulation ou de concentration de l'érosion. Ces facteurs en font un espace sensible, où les interactions entre géologie, topographie et hydrodynamique doivent être finement prises en compte (Makhoukh et al., 2011 ; Laffitte, 1939).

#### **2.4.1. Stratigraphie et aperçu lithologique global**

Le substratum géologique du bassin versant de l'Oued El-Hai révèle une succession stratigraphique complexe, allant de la fin du Crétacé jusqu'au Quaternaire. Cette diversité lithologique reflète l'évolution tectono-sédimentaire de la région et influe directement sur les processus d'infiltration, de ruissellement et d'érosion, en particulier dans les zones montagneuses telles que les monts de Bellezma et le Djebel Metlili.

##### **a) Le Crétacé**

Les formations affleurant au niveau des monts de Bellezma et de Metlili remontent au Crétacé inférieur et sont essentiellement constituées de grès compacts, de marnes friables, ainsi que de bancs gypseux localisés. Ces roches influencent l'infiltration des eaux pluviales, en modulant la percolation et le ruissellement superficiel. Plus au sud, les dépôts marno-calcaires du Crétacé supérieur, visibles dans la vallée de l'Oued Fedhala, interviennent également dans la dynamique des eaux souterraines grâce à leur porosité variable.

##### **b) Le Tertiaire**

Le bassin présente également des formations du Miocène, largement répandues dans des zones comme Maafa et Djebel Mahmal. Ces couches marneuses, atteignant parfois jusqu'à 1800 mètres d'épaisseur, sont riches en gypse et contribuent à façonner des reliefs ondulés. Leur comportement hydrologique est notable : elles participent à la régulation des écoulements de surface et peuvent alimenter des nappes peu profondes.

### **b) Le Quaternaire**

Les dépôts quaternaires, bien développés dans les plaines et les vallées, se composent de conglomérats, de graviers et d'alluvions sableux. Leur perméabilité en fait des unités stratigraphiques cruciales pour la recharge des nappes phréatiques. Elles jouent également un rôle dans l'amortissement des crues en stockant temporairement les eaux, bien qu'elles soient vulnérables à l'érosion en cas de précipitations extrêmes.

### **c) Le Jurassique et le Trias**

Les formations jurassiques, dominées par des calcaires et dolomies, ainsi que les affleurements triasiques des Aurès, révèlent une histoire géologique ancienne et structurante. Les diapirs triasiques, composés d'intercalations de calcaire et de dolomie, influencent la topographie locale et peuvent générer des dépressions naturelles, agissant comme des zones de rétention ou de concentration des flux hydriques.

## **2.5 Les grands ensembles physiques**

Le bassin versant de l'Oued El-Hai présente une grande diversité de milieux naturels, chacun influençant directement la dynamique hydrologique de la région. Cette diversité peut être subdivisée en trois grands types de milieux physiques : les montagnes, les piémonts et les plaines.

### **2.5.1. Les montagnes**

Les montagnes dominent la zone nord du bassin versant de l'Oued El-Hai et sont principalement constituées des massifs montagneux des Aurès. Parmi les montagnes notables, on trouve les monts **d'Asker (1833 m)**, le Djebel **Ich Ali (1815 m)** et la chaîne de Belezma, dont le point culminant atteint 2091 m, représentant ainsi l'altitude la plus élevée de la région.

Au sud-ouest du bassin, le Djebel **Metlili (1496 m)** fait également partie de cette chaîne montagneuse.

Ces reliefs, orientés d'ouest en est, présentent des altitudes progressives et forment une barrière naturelle ayant un impact significatif sur le climat et l'hydrologie de la région. Sur le plan climatique, ces montagnes influencent les précipitations, les températures et les vents, créant un contraste entre les versants nord, généralement plus humides, et les versants sud, plus arides.

D'un point de vue hydrologique, ces montagnes jouent un rôle primordial en captant les eaux de pluie et en alimentant les cours d'eau du bassin, notamment l'Oued El-Hai. Elles contribuent également au ruissellement et à la recharge des nappes phréatiques, agissant ainsi comme des réservoirs naturels d'eau et favorisant l'écoulement des eaux vers les plaines environnantes (**Auzet, 1987; Wischmeier & Smith, 1978**).

### **2.5.2. Les piémonts**

Les piémonts représentent une zone de transition géomorphologique stratégique entre les reliefs montagneux du bassin versant de l'Oued El-Hai et les plaines adjacentes. Disposés principalement selon un axe est-ouest, avec une extension méridionale marquée, ces secteurs se caractérisent par une alternance de collines douces et de surfaces planes inclinées. Les altitudes y oscillent entre 1200 et 1600 mètres, conférant à la région une morphologie modérée qui influence divers processus naturels, notamment l'écoulement des eaux. Sur le plan hydrologique, les piémonts assurent la collecte et la transmission des eaux de ruissellement issues des versants montagneux vers les plaines, jouant ainsi un rôle de relais hydrique fondamental. Leur couverture pédologique relativement fertile et leur pente modérée en font également des espaces favorables aux activités agricoles. De surcroît, ces zones agissent comme des interfaces fonctionnelles entre les milieux montagnards et les zones de basse altitude, contribuant à la régulation des flux hydrologiques et à la diversité écologique de l'ensemble du bassin (**Makhoukh et al., 2011**).

### **2.5.3. Les plaines**

Les plaines constituent la portion la plus plane du bassin versant de l'Oued El-Hai, localisée au sud-ouest des piémonts. Leur altitude varie généralement entre 800 et 1200 mètres, selon les courbes de niveau. Formées principalement de dépôts alluviaux tels que les sables, les graviers et les limons, ces plaines résultent des accumulations successives de sédiments déposés par les crues périodiques des oueds.

Grâce à la texture fine et à la capacité de rétention d'eau de leurs sols, ces zones sont particulièrement propices aux activités agricoles, notamment saisonnières.

Les apports alluviaux lors des inondations améliorent la fertilité des sols par l'enrichissement en éléments nutritifs, ce qui se traduit par une productivité élevée. Toutefois, ces bénéfices sont contrebalancés par les risques d'inondations récurrents, qui exigent la mise en place de mesures de gestion hydraulique efficaces.

Ainsi, bien que les plaines jouent un rôle fondamental dans la dynamique agricole et socioéconomique de la région, leur vulnérabilité face aux aléas hydrologiques impose une gestion durable, intégrée et préventive (**Soutter, 2007 ; Makhoukh et al., 2011**).

## **2.6. La structure du bassin**

La configuration topographique variée du bassin versant de l'Oued El-Hai découle en grande partie de son histoire géologique et tectonique. Les mouvements tectoniques anciens ont entraîné à la fois le soulèvement des reliefs et l'effondrement de certaines zones, donnant naissance à une topographie contrastée. Ces déformations structurales influencent profondément le fonctionnement hydrologique du bassin ainsi que les processus de transport sédimentaire et d'érosion.

Le bassin présente une organisation géologique marquée par des plis anticlinaux et synclinaux orientés principalement selon un axe nord-est/sud-ouest, témoignant d'une activité tectonique soutenue.

Cette structuration est le reflet d'une dynamique géodynamique intense, qui a contribué à modeler le paysage actuel au fil du temps. Comme le souligne Laffitte (1939), les forces internes de la Terre ont joué un rôle décisif dans la mise en place du relief régional. Ainsi, la structure tectonique du bassin n'est pas seulement à l'origine de sa morphologie, mais conditionne également les flux hydriques et les zones d'accumulation ou de concentration de l'érosion. Ces facteurs en font un espace sensible, où les interactions entre géologie, topographie et hydrodynamique doivent être finement prises en compte (Makhoukh et al., 2011 ; Laffitte, 1939).

### **2.6.1. Stratigraphie et aperçu lithologique global**

Le substratum géologique du bassin versant de l'Oued El-Hai révèle une succession stratigraphique complexe, allant de la fin du Crétacé jusqu'au Quaternaire. Cette diversité lithologique reflète l'évolution tectono-sédimentaire de la région et influe directement sur les processus d'infiltration, de ruissellement et d'érosion, en particulier dans les zones montagneuses telles que les monts de Bellezma et le Djebel Metlili.

**d) Le Crétacé**

Les formations affleurant au niveau des monts de Bellezma et de Metlili remontent au Crétacé inférieur et sont essentiellement constituées de grès compacts, de marnes friables, ainsi que de bancs gypseux localisés. Ces roches influencent l'infiltration des eaux pluviales, en modulant la percolation et le ruissellement superficiel. Plus au sud, les dépôts marno-calcaires du Crétacé supérieur, visibles dans la vallée de l'Oued Fedhala, interviennent également dans la dynamique des eaux souterraines grâce à leur porosité variable.

**b) Le Tertiaire**

Le bassin présente également des formations du Miocène, largement répandues dans des zones comme Maafa et Djebel Mahmal. Ces couches marneuses, atteignant parfois jusqu'à 1800 mètres d'épaisseur, sont riches en gypse et contribuent à façonner des reliefs ondulés. Leur comportement hydrologique est notable : elles participent à la régulation des écoulements de surface et peuvent alimenter des nappes peu profondes.

**e) Le Quaternaire**

Les dépôts quaternaires, bien développés dans les plaines et les vallées, se composent de conglomérats, de graviers et d'alluvions sableux. Leur perméabilité en fait des unités stratigraphiques cruciales pour la recharge des nappes phréatiques. Elles jouent également un rôle dans l'amortissement des crues en stockant temporairement les eaux, bien qu'elles soient vulnérables à l'érosion en cas de précipitations extrêmes.

**f) Le Jurassique et le Trias**

Les formations jurassiques, dominées par des calcaires et dolomies, ainsi que les affleurements triasiques des Aurès, révèlent une histoire géologique ancienne et structurante. Les diapirs triasiques, composés d'intercalations de calcaire et de dolomie, influencent la topographie locale et peuvent générer des dépressions naturelles, agissant comme des zones de rétention ou de concentration des flux hydriques.

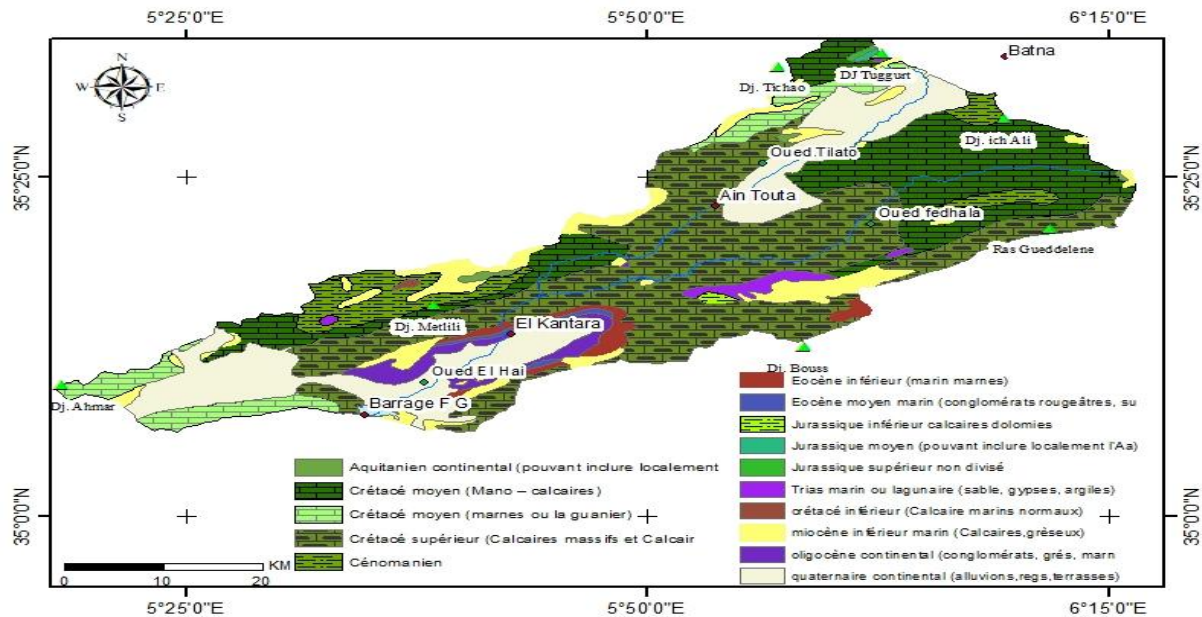


Figure II -3 Lithologie du bassin versant de l'Oud El Hai.

**2.7. Caractéristiques lithologiques et perméabilité des roches des bassins versants**

**2.7.1. Caractéristiques lithologiques des roches des bassins versants**

La diversité lithologique du bassin versant de l'Oued El-Hai exerce une influence déterminante sur les mécanismes hydrologiques locaux, notamment l'infiltration et l'écoulement de surface. La perméabilité des terrains varie selon la nature des formations géologiques en présence, que l'on peut regrouper en trois grandes catégories :

**2.7.1.1. Formations calcaires et marno-calcaires du Cénomanién-Turonien**

Ces formations, largement réparties autour de Dechra Tilatou et de l'oued Fedhala, se caractérisent par leur compacité élevée et leur faible porosité, ce qui limite considérablement la pénétration des eaux pluviales. La perméabilité y est donc très faible, favorisant un ruissellement intense et une infiltration réduite, ce qui accentue les risques d'érosion superficielle (Djemai et al., 2019 ; Carte géologique de Batna, 1/50.000).

**2.7.1.2. Formations gréseuses et marno-calcaires du Miocène**

Présentes notamment au sud d'El Outaya et au nord des Tamarins, ces formations affichent une perméabilité intermédiaire. Les grès à grains grossiers facilitent partiellement l'infiltration, tandis que les intercalations marneuses agissent comme des barrières imperméables, générant une hétérogénéité spatiale dans les flux hydriques (Boumediene et al. 2016 ; Carte géologique de Biskra, 1/50.000).

### 2.7.1.3. Formations composites : marnes, conglomérats et calcaires

Au nord d'El Kantara et en périphérie du Djebel El Mahmel, ces unités géologiques présentent une variabilité marquée de leur perméabilité. Les conglomérats grossiers, lorsqu'ils sont faiblement cimentés, permettent une bonne infiltration, contrairement aux marnes argileuses, qui en limitent fortement la circulation. Cette variabilité influence directement sur la dynamique des nappes locales et sur la sensibilité des sols à l'érosion (Laffitte, 1939 ; Aït Amar et al., 2020).

La répartition spatiale de la perméabilité au sein du bassin versant de l'Oued El-Haï est étroitement conditionnée par la diversité lithologique des formations géologiques. Cette hétérogénéité influence à la fois la recharge des nappes souterraines et les dynamiques de l'érosion hydrique, d'où la nécessité de disposer d'une cartographie géologique détaillée pour orienter efficacement la gestion hydrologique durable (voir Figure II.2).

## 2.8 Caractéristiques Géographiques Du Bassin Versant

### A. Caractéristiques de forme:

Le bassin versant d'Oued El-Hai couvre une superficie de 1660 km<sup>2</sup> et possède un Périmètre de 193 km.

Ce bassin versant est constitué par un relief varié, Le bassin versant de Oued El-Hai se situe dans le piémont Sud des Aurès; il fait partie du grand bassin hydrographique de Chott Melghir ; il est limité au Nord par le bassin versant des hauts plateaux constantinois; à l'Est par le bassin versant de Oued Abdi ; à l'Ouest par le bassin versant de Chott El-Hodna (Fig N° II-2).

### B. Indice de capacité de Gravelius Kc:

C'est la comparaison entre le périmètre du Bassin versant à celui d'un cercle de même surface.

$$Kc = 0,28P / \sqrt{A}$$

Avec :

P: Périmètre en Km (P =193 Km) A Surface en km<sup>2</sup> (A = 1660Km<sup>2</sup>)

Où: Kc proche de 1,12 => la forme du bassin versant arrondi

Kc loin de 1,12 => la forme allongée.

La valeur de Kc = 1,32 loin de 1,12 indique que le bassin versant est de forme allongé, ce qui augmente théoriquement le temps de concentration.

### C. Rectangle équivalent :

Cette notion a été introduite pour pouvoir comparer des bassins entre eux du point de vue de

l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement. Soit L et I la longueur et la largeur du rectangle, et P et A le périmètre et l'aire du bassin versant.

On a:

- La longueur L: 
$$\frac{K\sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right]$$

A.N:  $K_c=1.32$        $A=1660 \text{ Km}^2$        $P=193 \text{ Km} \implies L=62.112 \text{ Km}$

- La largeur I:       $L \cdot I=A$        $\implies$

A.N:       $I=26.725 \text{ Km}$

**2.8.1. LES INDICES DE PENTE:**

**A. Indice de ROCHE:**

$$IPR = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i * d_i} = 0,14$$

D'ou :

L : Longueur de rectangle équivalent en m.

ai : Dénivelée entre deux courbes de niveau en m.

di: Surface par tranche entre deux courbes de niveau en %.

A.N:       $IPR = 0.14 \text{ m/km}^2$

**\* Indice de pente moyenne I<sub>m</sub> :**

Il est calculé selon la formule suivante :

$$I_m = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{A}$$

**H<sub>max</sub>** : Altitude maximale du b.v

**H<sub>max</sub> = 1690 m**

**H<sub>min</sub>** : Altitude minimale du b.v

**H<sub>min</sub> = 520 m**      **A : superficie** du b.v

**A = 1660km<sup>2</sup>**

$$A.N : I_m = 28.71 \text{ m / km}$$

**B. Indice de pente globale Ig:**

$$I_g = D/L = 14,98 \text{ m/km}^2$$

Au temps que la superficie du bassin versant est supérieure à 25 km<sup>2</sup> ; l'indice de pente Ig n'est pas significatif et il faut le corriger.

**C. Dénivelé spécifique DS:**

$$DS = I_g \sqrt{A} = 610,33 \text{ m}$$

Selon la classification de l'ORSTOM, le relief de la zone d'étude est de la classe R7 ; c'est -a-dire un relief très fort ; ce qui encourage le déclenchement de tous les processus d'abrasion.

**D. Coefficient orographique Co:**

$$Co = \overline{H} * tg \alpha = 286,66$$

$$\overline{H} = H_{moy} - h_{min}$$

Où :

Hmoy : Altitude moyenne en mètre hmin : Altitude minimale en mètre. S: Surface du bassin versant en km<sup>2</sup>.

Donc : CO > 6 => Le relief du bassin versant est accentué.

**2.9. Le couvert végétal**

La végétation joue un rôle primordial dans la régulation hydrologique des bassins versants. Elle atténue le ruissellement, réduit l'évaporation, augmente la capacité de rétention d'eau, tout en limitant l'érosion et le transport des sédiments (Morgan, 2005 ; Roose, 1996). Bien que l'étude du couvert végétal ne constitue pas l'objectif principal de cette recherche, il est crucial d'en décrire les principales caractéristiques, telles que son état de dégradation, sa distribution spatiale, ainsi que ses fonctions écologiques.

**2.9.1. Rôle hydrologique du couvert végétal**

Le couvert végétal agit comme une barrière physique contre l'impact des gouttes de pluie et le ruissellement de surface. Il diminue l'énergie cinétique de l'eau, favorise son infiltration, et stabilise les sols grâce à l'action des racines (Wischmeier & Smith, 1978 ; FAO, 2015). Une

végétation dense améliore également la rétention d'humidité et soutient l'activité biologique des sols (Lal, 1990).

Les effets principaux de la végétation peuvent être résumés comme suit :

- Contrôle du ruissellement : en interceptant et ralentissant le mouvement de l'eau.
- Amélioration de l'infiltration : par la structuration du sol grâce aux racines des plantes.
- Réduction de l'érosion : en protégeant le sol des impacts directs des gouttes de pluie.
- Atténuation des crues : en régulant les débits de pointe des rivières.
- Protection de la qualité de l'eau : en filtrant les sédiments et les polluants (FAO, 2015 ; Andréassian, 2004).

### **2.9.2. Typologie du couvert végétal**

La classification utilisée dans cette étude repose sur la densité du couvert, selon la typologie de Tricart (1968), qui distingue trois niveaux de protection contre l'érosion :

- ✓ **Zones bien protégées** : Forêts naturelles denses, assurant une forte stabilité du sol et une infiltration efficace des eaux.
- ✓ **Zones partiellement protégées** : Cultures temporaires ou vergers espacés, présentant une vulnérabilité saisonnière à l'érosion.
- ✓ **Zones peu protégées** : Steppes dégradées, pâturages surexploités ou sols nus, où le ruissellement est intense et l'érosion est accélérée.

### **2.9.3. État du couvert végétal dans le bassin versant de l'Oued El Hai**

- ✓ L'analyse repose sur des documents cartographiques fournis par l'Office National des Forêts (ONF, 2001) et un plan de mise en valeur agricole à l'échelle 1/50 000. Ces sources révèlent une dégradation importante du couvert végétal, notamment dans les zones montagneuses où le taux de déforestation atteint 27 %, en grande partie à cause des effets historiques de la guerre de libération nationale.
- ✓ Les forêts encore préservées se concentrent dans le massif des Aurès, particulièrement dans les montagnes de Belsama, la région de Menaa, et l'ouest de Bouzina, entre 1400 et 1600 m d'altitude. Elles sont principalement composées de cèdres de l'Atlas, de

chênes verts et de conifères. En revanche, les versants sud du mont Mahmel, d'Askour et du mont Matlili témoignent d'un affaiblissement marqué du couvert végétal.

- ✓ Les prairies naturelles, bien que limitées, jouent un rôle protecteur dans les vallées, comme c'est le cas à Bouzina. En revanche, les cultures céréalières de Bouzina Est, Beni Fedhala et Maafa, bien qu'efficaces pendant la période de croissance, rendent le sol vulnérable le reste de l'année. Les plaines dégarnies, notamment au nord d'Atayya, amplifient les risques de ruissellement, d'érosion et d'inondations.

#### 2.9.4. Carte du couvert végétal: répartition et vulnérabilité

- ✓ L'analyse de la carte (Figure 2-4) révèle une grande hétérogénéité dans la densité et la distribution de la végétation. Le couvert est classé en cinq niveaux, selon un indice de densité (variant de 0 à 0,58) :

**État critique (0 - 0,14) :** zones très dégradées, occupant la majeure partie du centre et du sud du bassin. Ce sont les plus exposées à l'érosion.

**Zone dégradée (0,14 - 0,18) :** dégradation modérée, avec un impact écologique important.

**Zone très dégradée (0,18 - 0,27) :** principalement dans les reliefs du sud et sud-ouest.

**Couvert végétal dense (0,27 - 0,38) :** localisé dans le nord-est du bassin (Aïn Touta, Oued Fedhala), dominé par des espèces arborées.

**Couvert végétal très dense (0,38 - 0,58) :** rare, localisé dans des zones isolées au nord-est, témoignant de fortes pressions anthropiques.

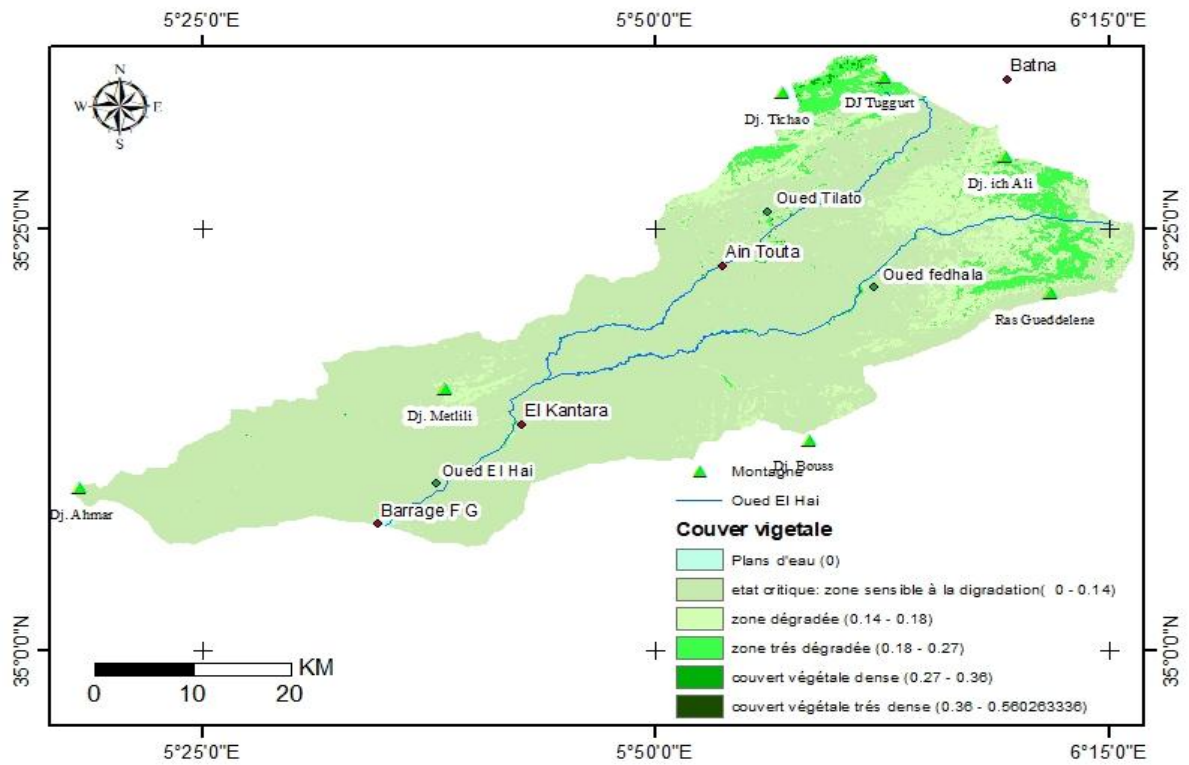


Figure 2-4 Carte de la végétation du bassin versant de l'Oued El Hai.

### 2.10 La perméabilité :

L'expérience a montré que la perméabilité est très importante dans les études d'érosion, D'ailleurs la Sogrèah en 1969 a trouvé une relation exponentielle entre l'apport solide spécifique et l'apport liquide en fonction de la perméabilité des bassins versants ; dans les terrains perméables le risque d'érosion provoqué par les écoulements est faible ; par apports aux terrains imperméables (voir la figure N° 2.6).

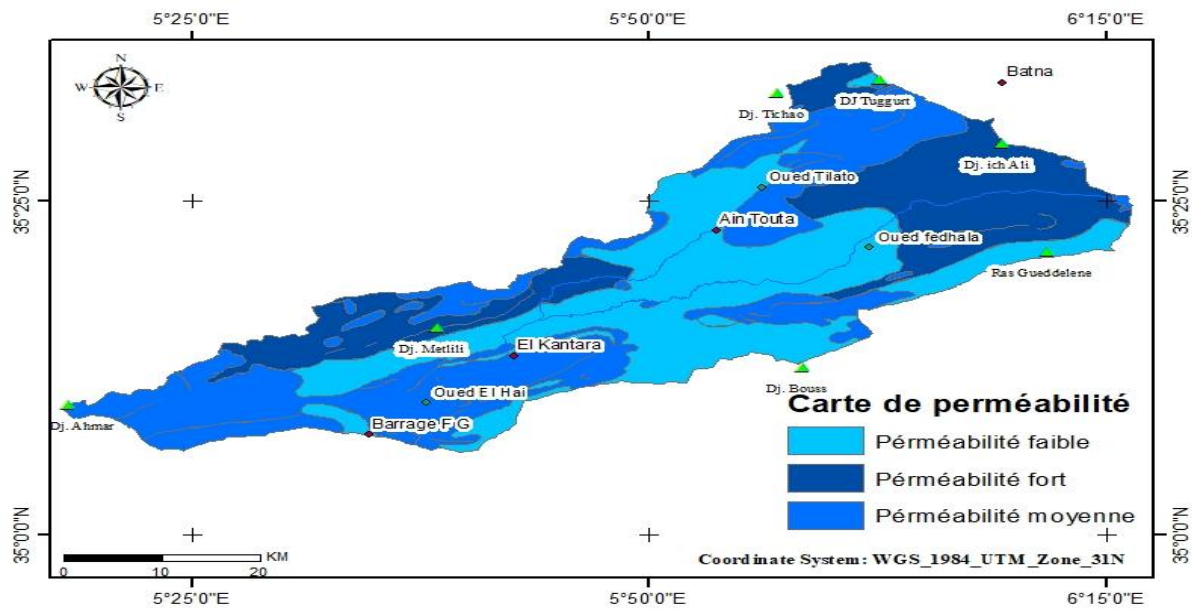


Figure II-5: Carte de la perméabilité de bassin versant d'oued El Hai

Selon la nature des formations, nous avons les groupées dans des classes de perméabilité et leurs superficie enregistré dans le tableau suivant :

Tableau N°2-1 : la perméabilité des formations de la zone d'étude

Formations	Perméabilité	superficie	
		Km <sup>2</sup>	%
-Galets, éboulis, graviers (El-Kantara)	Permeable	110,72	6,67
-Grés -Calcaire-marneux -Marno -calcaire -Calcaire gréseux	Semi-perméable	908,18	54,71
-Marne	Perméabilité faible	261,62	15,76
-Calcaire massif -Argile (Ain Touta) -Dolomie	impermeable	379,48	22,86

Nous avons plus de la moitié (54,71 %) de la superficie du bassin versant des formations semi-perméables suit par les formations imperméables de 22,86 % dans la partie amont et les marnes 15,75 % à perméabilité faible dans la zone de transition entre la plaine de Ain Touta et

celle d'El-Kantara .En fin les formations perméables avec la plus petite superficie 6,67 % dans la plaine d'El- kantara.

En générale, le bassin versant de Oued El-Hai caractérisé par une perméabilité faible à moyenne.

### 2.10.1 Les sols :

C'est le support de tous les êtres vivants animaux et végétaux, l'évolution de ces derniers est lie au degré de développement des sols. La carte des sols, du bassin versant de Oued El-Hai, montre la répartition des sols suivants :

#### A. Sols à minéraux bruts :

- ✓ Lithosols et régosols : le type le plus fréquent (49,94%) ; repose sur un substratum généralement marno-calcaire, calcaire-marneux, calcaire massif ou marne ; dans les hautes montagnes, à profile AC, caractérise par une texture grossière, coupé par le ravinement.
- ✓ Sols D'apports alluviales : se localise le long du talweg principal ; avec une superficie de (7,67%). La texture est grumeleuse ; la profondeur peut arriver à 2 mètres.
- ✓ Sols d'apports éoliens : Ils couvrent une superficie de 9,05 % au Sud-Ouest du B.V près du barrage, la profondeur est faible.
- ✓ Sols peu évolués D'apports colluvial : (Modaux, steppises, -calcimorphes) : se situent sur la plaine de Ain Touta avec une bonde allongée au tour de Oued Tilatou, représentant 9,45 % de la superficie total, Ils reposent sur les formations quaternaires où la pente est très faible.
- ✓ Sols à encroûtement calcaire : Ils se localisent en générale sur les formations quaternaires dans les glacis autours des plaines, souvent recoupés par le ravinement. Ce type de sol est le plus érodé, car il se situe dans les pentes moyennes (4-12 %) et recouvrant une superficie de 23,89%.

En conclusion, les sols du bassin versant de Oued El-Hai sont très pauvres en éléments nutritif, ce qui abaisse sa cohésion et laisse le ravinement se développe. Pour accepte cette hypothèse, il faut passe à l'utilisation des sols.

## 2.11 Morphométrie

### 2.11.1. La Densité De Drainage Dd:

On peut la définir comme étant la longueur de réseau hydrographie par unité de surface.

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} \quad (R. Gloor, 1982)$$

A: La surface en km<sup>2</sup>

Dd: Densité de drainage en Km/km<sup>2</sup>

La carte de densité de drainage, été réalisée à partir des cartes topographiques à l'échelle 1/50 000, qui couvre la totalité du bassin étudié.

Nous avons calculé la longueur de réseau hydrographique dans chaque maille de 1km<sup>2</sup>. Afin de regrouper les résultats dans des classes arbitraires et leurs répartitions spatiales.

**Tableau 2-2 : Les valeurs de la densité de drainage**

Classe	Densité de drainage	Surface km <sup>2</sup>	S (%)
I	<2	352	21,20
II	2 – 4	482	29,04
III	4 – 6	663	39,94
VI	> 6	163	9,82
TOT	4,22	1660	100%

L'objectif a rapproché de cette carte est de savoir le degré d'adaptation de réseau aux autres caractéristiques physiques (pente, nature des formations, ...). L'interprétation du tableau et de la carte montre que la classe III (4 - 6km<sup>-1</sup>), est la plus dominante avec une superficie de 39,94 %, suite par la classe (II), la on peut dire que 68 ,98 % de la superficie totale du bassin versant de Oued EL-Hai dans est représentée par une densité de drainage qui varié entre (2 – 6 Km<sup>-1</sup>) les piedmonts et les bas de versants.

### 2 .11.2. LE TALWEG PRINCIPALE:

La topographie de la cour d'eau principale joue un rôle très important dans le transport des matériaux vers l'aval (barrage).

Le profil topographique (Fig N° 2-7); montre une pente moyenne environ de 2,28 % dans la plus grande partie de talweg (65Km) Amont d'El-Kantara ; où la vitesse d'écoulement

augment et même le volume du transport solide de différents types; ainsi que le sapement des berges. Par contre dans la partie aval d'El-Kantara jusque au site du barrage où la pente moyenne devient faible environ de 0,83% sur une longueur de 20,5 Km.

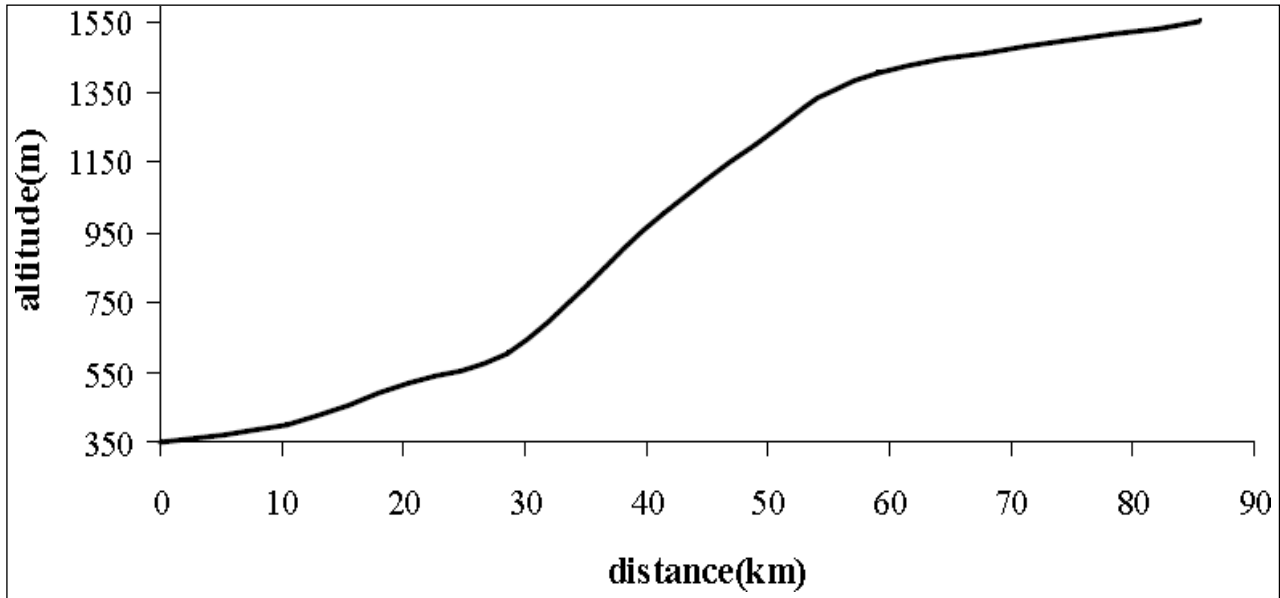


Figure N° 2-6: Profil topographique du talweg principal

### 2.11.3. Le Temps De Concentration (Tc) :

Le calcul du temps de concentration se fait par la formule de GIANDOTTI :

$$TC = \frac{4\sqrt{S} + 1,5Lp}{0,8\sqrt{H_{moy} - h_{min}}} = 13,67 \approx 14 \text{ heures}$$

Où :

S : Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>

Lp : Longueur de talweg principale en Km.

Hmoy : Altitude moyenne en mètre.

Hmin : Altitude minimale en mètre.

Alors que la vitesse de transfert des écoulements se calcule de la façon suivante :

$$V = Lp / TC = 6,11 \text{ Km /heure} = 1,7 \text{ m /s}$$

C'est une vitesse importante, qui peut exprimer la pente forte du talweg principale. Les résultats de la morphométrie du bassin versant sont consignés dans le tableau N°2-3.

Tableau N°2-3 : Récapitulation des caractéristiques morphométriques du bassin versant

caractéristiques	Unite	B. V
S	Km <sup>2</sup>	1660
P	Km	193
KC	/	132
L	Km	73.43
la	Km	22.6
H50%	M	980
H5%	M	1690
H95%	M	520
Hmoy	M	1039.83
Hmax	M	2091
Hmin	M	350
Pentemoyenne	m/km	28.71
Ig	m/km	15.93
Ds	M	649.04
IPR	/	0.14
d	Km/km <sup>2</sup>	4
TC	Heure	13.8
V	m/s	1.72
Lp	Km	85.5
CO	/	286.66
CM	/	0.41
F1	/	5.76
CT	/	21.7

## 2.12 .Géologie Des Bassins Versants:

Les Aurès ont fait l'objet d'étude par plusieurs géologues et en particulier R. LAFFITTE qui a réalisé l'esquisse géologique des Aurès en 1939 couvrant la région d'étude.

### 2.12.1 Domaine Morpho-Structurale:

#### 2.12.2. Les Synclinaux:

Le bassin versant de Oued El-Hai rejoint deux synclinaux :

### 2.12.3. Synclinale Batna– Ain Touta:

Avec une direction NE-SW, est constituée essentiellement par des alluvions de quaternaire; avec des affleurements des marnes; qui sont surmontées par des assises détritiques continentales (conglomérat et grès).

### 2.12.4. Synclinale D'el-Kantara:

Cité par R. Guiraud, 1973. Les calcaires massifs de demi cluse d'El-Kantara reviennent au Maestrichtien avec une épaisseur de 340 mètre vers le Sud, surmonte par des formations de l'Oligocène, Miocène et Quaternaire ; formées essentiellement par des marnes, galets, alluvions, argile et sables.

A la base du flanc Sud de Dj. Mimoun, on observe un affleurement de paléocène représentant des faciès de marnes rouges (25m), grès et poudingues d'après J.L.Ballai.

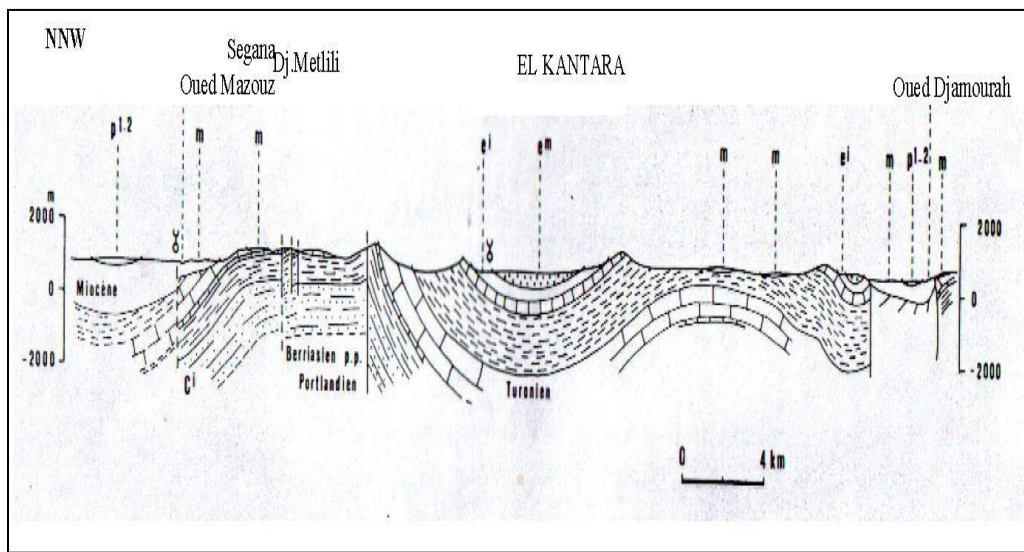


Figure N° 2-7 : Coupe du val d'El-Kantara (d'après R. Guiraud, 1973)

## 2.13. CONCLUSION :

Le bassin versant d'Oued El-Hai est caractérisé par des composantes stables du milieu physique qui favorise le déclenchement de toute les formes d'érosion.

Les altitudes décroissent de l'amont vers l'aval avec un dénivelé de 1714 m, les pentes sont moyennes à fortes de 71,63%, avec des formations moyennes à faibles résistance à l'érosion de 63,08%, semi-perméable 54,71%, les caractéristiques morphométriques montrent

l'existence d'une dynamique active, justifiée par une densité de drainage moyenne à forte (68,98%), les sols sont squelettiques peu évolués à minéraux bruts de 49,94% et mal protégés par une végétation dégradée à très dégradée particulièrement des maquis 58,05%.

Tous ces facteurs ont prouvé que la zone d'étude souffre des phénomènes d'érosion.

## **CHAPITRE III- Cartographie du code de perméabilité b et de l'indice de perméabilité K**

### **3.1. Introduction :**

La compréhension des processus hydrologiques au sein d'un bassin versant repose en grande partie sur l'analyse des propriétés physiques du sol, notamment sa perméabilité et sa structure. Ces paramètres jouent un rôle fondamental dans la régulation des flux hydriques, influençant directement l'infiltration, le ruissellement de surface et la recharge des nappes phréatiques. De plus, la structure du sol conditionne sa stabilité, sa vulnérabilité à l'érosion ainsi que sa capacité de rétention en eau, éléments clés dans l'évaluation des dynamiques environnementales.

Dans cette optique, la cartographie du code de perméabilité b et de l'indice de perméabilité K constitue une étape cruciale pour la caractérisation spatiale des potentialités hydrauliques des sols. Elle repose sur l'exploitation conjointe de données pédologiques, géologiques, topographiques et d'observations de terrain, intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG). Cette démarche permet non seulement d'identifier les zones contrastées en termes de comportement hydrique, mais aussi de fournir des éléments d'aide à la décision pour la gestion durable des ressources en eau, la lutte contre l'érosion et l'aménagement du territoire.

Ce chapitre a ainsi pour objectif de détailler la méthodologie suivie pour l'élaboration des cartes de perméabilité (code b) et de l'indice K, en mettant l'accent sur les étapes d'analyse, de classification et d'interprétation des résultats obtenus dans le contexte spécifique de la zone d'étude..

### **3.2. Méthodologie :**

La cartographie des codes de perméabilité et de structure repose sur l'analyse des caractéristiques pédologiques et géologiques extraites à partir de données ouvertes. Dans cette étude, les données ont été collectées à partir du site mondial **SoilGrids** et traitées à l'aide du logiciel **ArcGIS 10.8** afin de produire une carte représentative de la perméabilité des sols et de leur structure géologique.

Les données exploitées dans cette étude proviennent de la plateforme mondiale SoilGrids, mise en place par l'ISRIC. Cette base fournit des couches thématiques relatives aux propriétés pédologiques avec une résolution spatiale élevée (jusqu'à 250 mètres ou moins). Les variables retenues pour l'analyse incluent notamment :

- Texture du sol (% argile, % sable, % limon)
- Profondeur effective
- Autres propriétés (le cas échéant)

Les couches ont été téléchargées au format raster (GeoTIFF) couvrant l'ensemble du bassin versant d'étude.

### **3.2.1 Prétraitement des données dans ArcGIS :**

Afin d'assurer une intégration correcte des données pédologiques dans le Système d'Information Géographique (SIG), plusieurs étapes de prétraitement ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8. Ces opérations visent à adapter les couches brutes téléchargées depuis la plateforme SoilGrids aux spécificités spatiales et analytiques de la zone d'étude. Voici les principales étapes effectuées :

La première étape a consisté à définir avec précision l'étendue spatiale de la zone d'étude. Pour cela, un shapefile représentant les limites hydrologiques du bassin versant (ou des sous-bassins) a été utilisé. Ce fichier de limites, obtenu à partir d'une carte topographique ou d'un modèle numérique de terrain (MNT), permet de restreindre les analyses aux seules entités géographiques pertinentes.

Une fois la zone d'étude définie, chaque couche raster issue de SoilGrids (par exemple, la teneur en argile, sable, matière organique, etc.) a été extraite à l'aide de l'outil "Clip Raster". Cette opération permet de réduire la taille des fichiers et de se focaliser uniquement sur la zone ciblée, évitant ainsi tout traitement inutile des zones en dehors du bassin.

Les rasters extraits ont ensuite été reprojétés vers le système de coordonnées de travail du projet, généralement un système UTM adapté à la localisation de la zone (ex. : UTM zone 31N, Datum WGS 1984). Cette reprojection garantit l'uniformité spatiale entre toutes les couches utilisées et facilite les analyses spatiales précises comme les calculs de surfaces ou de distances.

Enfin, chaque variable pédologique a été classifiée en plusieurs classes thématiques selon des seuils définis à partir de la littérature scientifique. Par exemple :

- La teneur en argile a été divisée en classes de faible, moyenne et forte teneur ;
- La proportion de sable a été utilisée pour estimer la perméabilité ;

Ces classifications ont été réalisées soit à l'aide de l'outil "Reclassify", soit par génération de nouvelles couches via le Raster Calculator.

### **3.2.2 Attribution des codes de perméabilité :**

Dans le but d'évaluer les capacités d'infiltration et les caractéristiques physiques des sols au sein de la zone d'étude, une classification des unités pédologiques a été réalisée sur la base de leurs propriétés texturales (teneurs en argile et en sable), ainsi que de leur structure interne. Cette étape permet de traduire les données brutes en indicateurs interprétables, utiles pour l'analyse hydrologique ou géomorphologique.

La perméabilité des sols a été estimée à partir des teneurs relatives en argile et en sable, conformément aux standards définis par les systèmes de classification pédologique internationaux, notamment ceux de la FAO (Food and Agriculture Organization) et de l'USDA (United States Department of Agriculture). Sur cette base, trois grandes classes de perméabilité ont été identifiées :

Tableau 3.1 : Attribution des codes de perméabilité en fonction des teneurs en sable et en argile.

<b>Code attribué</b>	<b>Perméabilité estimée</b>	<b>% de sable</b>	<b>% d'argile</b>	<b>Type de sol</b>
<b>3</b>	Forte perméabilité	> 70 %	< 20 %	Sols sablonneux
<b>2</b>	Perméabilité moyenne	30 – 50 %	20 – 40 %	Sols limoneux
<b>1</b>	Faible perméabilité	< 30 %	> 40 %	Sols argileux

Cette classification permet de cartographier les zones à fort potentiel d'infiltration (sables) et celles plus sujettes au ruissellement (argiles), ce qui est fondamental dans l'évaluation des risques d'érosion ou d'inondation.

### **3.2.3 Élaboration de la carte des codes de perméabilité :**

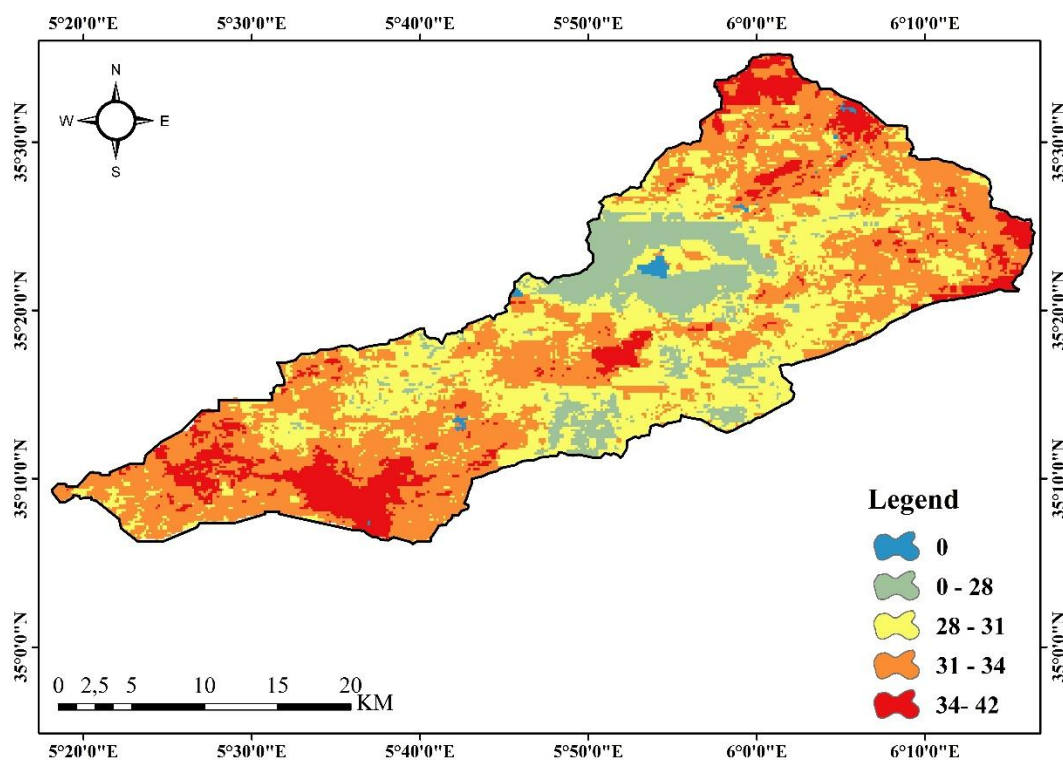
Après avoir déterminé les codes d'agrégats pour chaque unité de sol (**Figure 3.4**), l'étape suivante consistait à produire une carte texturale qui reflète la distribution spatiale des caractéristiques de perméabilité et de la structure du sol dans la zone d'étude. Pour atteindre

cet objectif, une série de cartes thématiques ont été produites, basées sur des données extraites de la plateforme mondiale SoilGrids et traitées à l'aide d'ArcGIS 10.8.

Ces cartes représentent les caractéristiques texturales et structurales de base du sol d'une manière spatiale précise, afin de comprendre plus profondément son comportement hydrologique, en particulier en ce qui concerne sa capacité d'infiltration et sa perméabilité (perméabilité). Ces cartes constituent un outil analytique essentiel pour évaluer la performance des sols en termes d'interactions avec l'eau de pluie et, par conséquent, pour étudier les risques d'érosion et d'inondation.

Parmi les couches produites figurent :

- ✓ La carte de la teneur en limon (% limon), qui permet d'identifier les zones à texture intermédiaire, influençant à la fois la rétention d'eau et l'aération du sol.



**Figure 3.1 : Carte du limon**

- ✓ La carte de la teneur en argile (% argile), utile pour localiser les sols à forte cohésion, souvent associés à une perméabilité réduite et un risque accru de ruissellement.

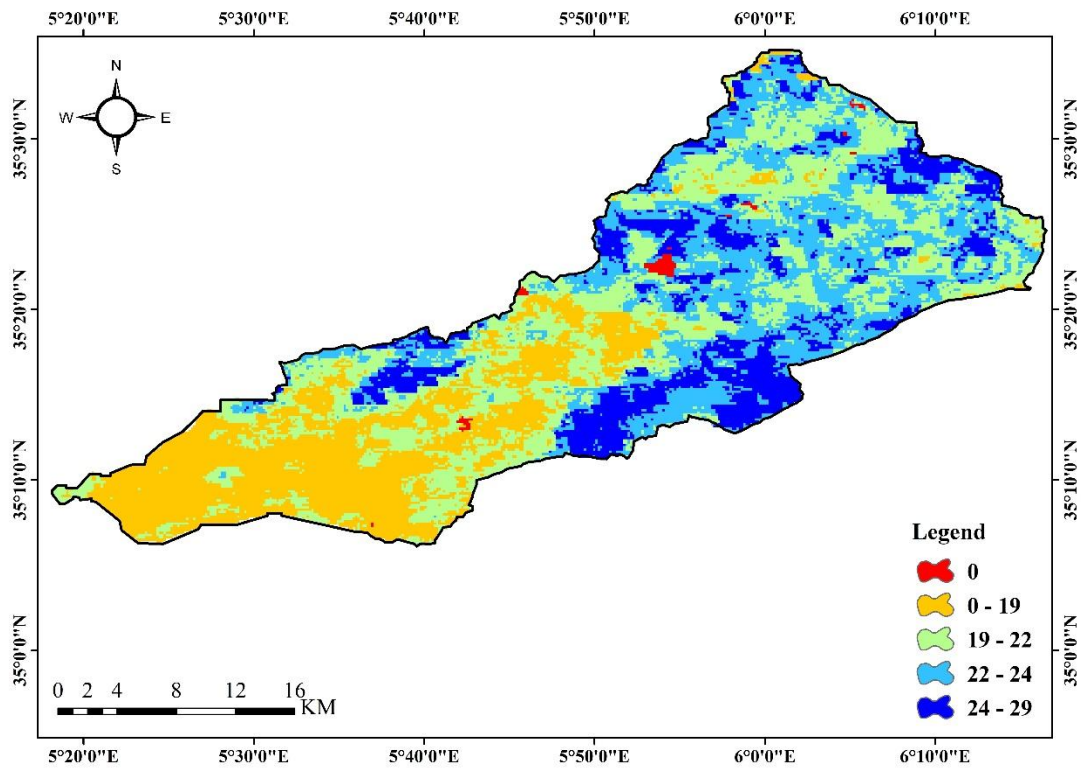


Figure 3.2 : Carte de l'argile

- ✓ La carte de la teneur en sable (% sable), indicatrice des zones à forte porosité et à infiltration rapide de l'eau.

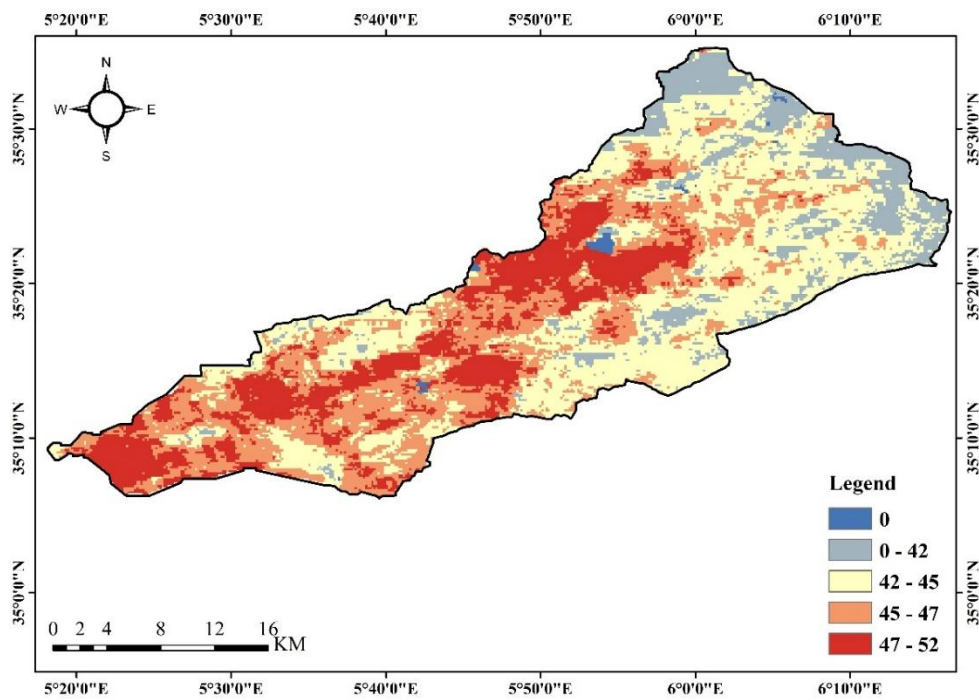


Figure 3.3 : Carte du sable

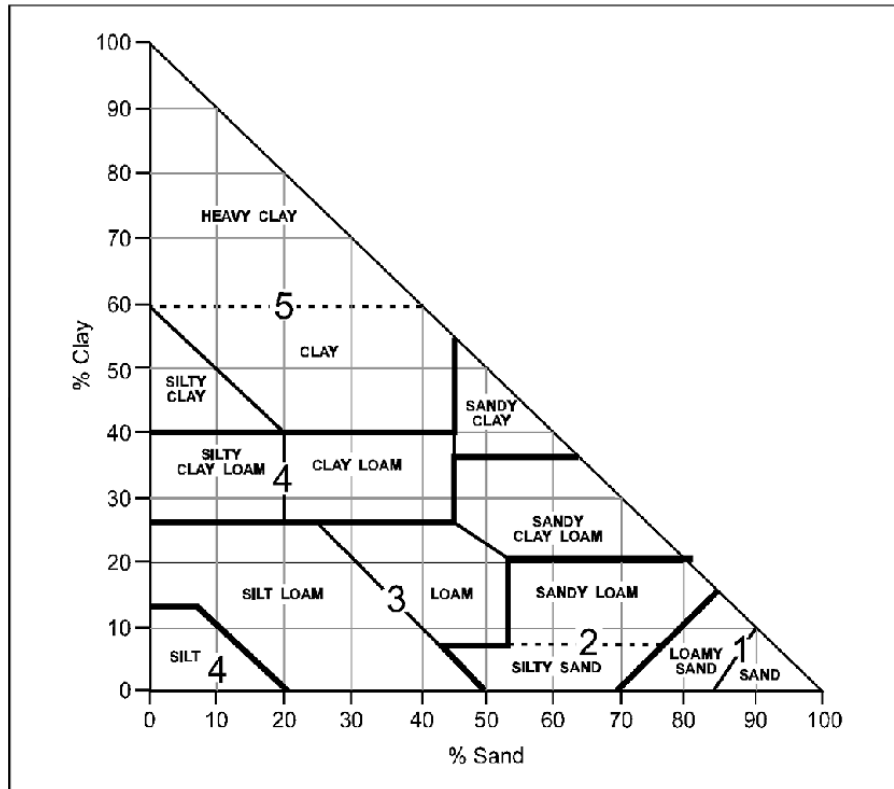


Figure N°3.4 : Codes de perméabilité basés sur la classification des textures (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

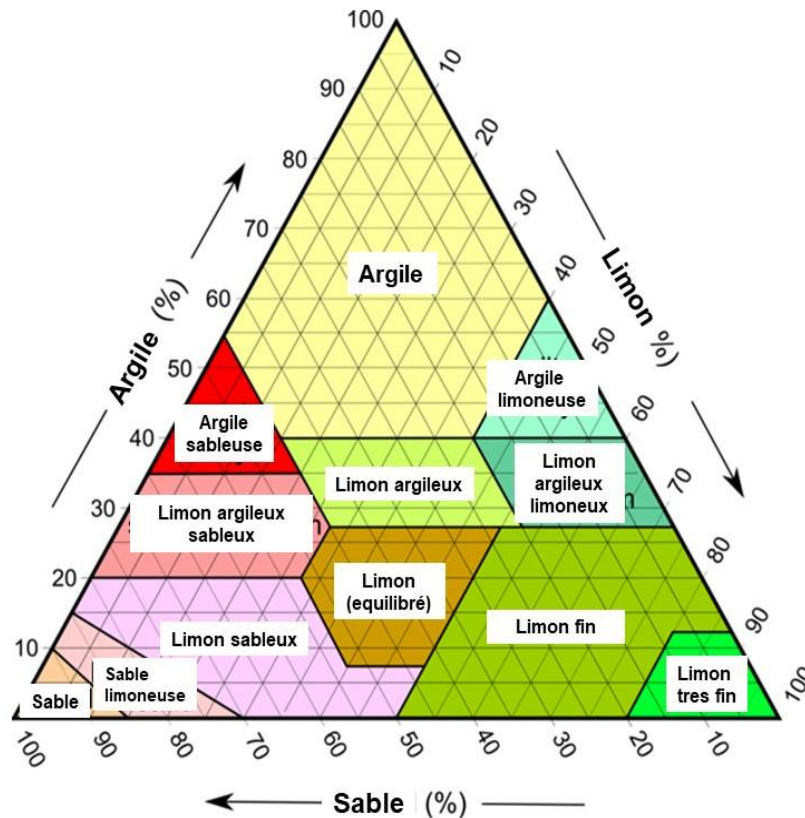
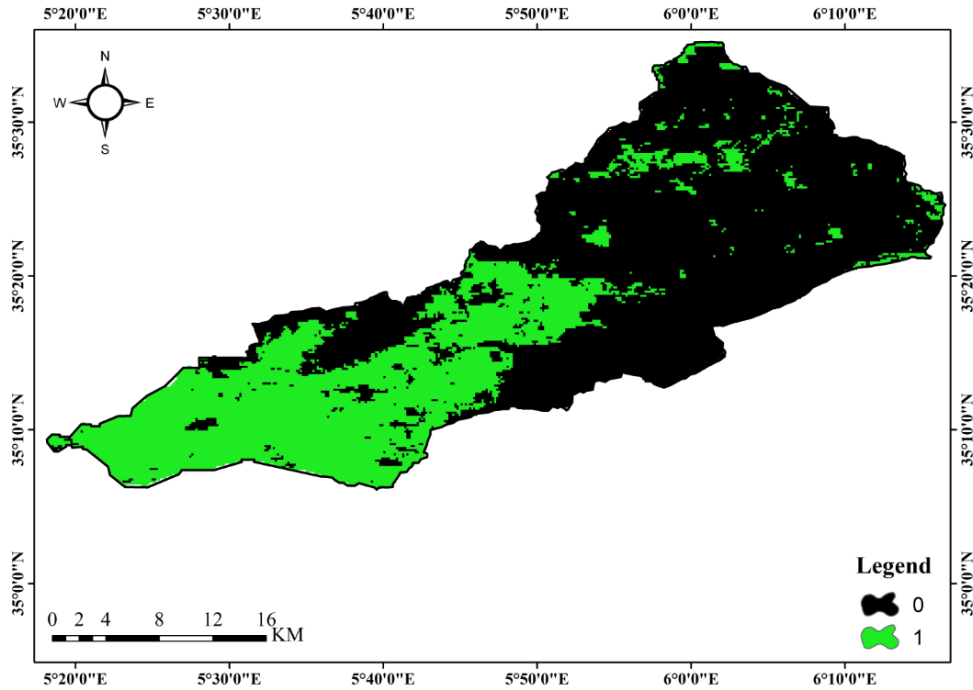


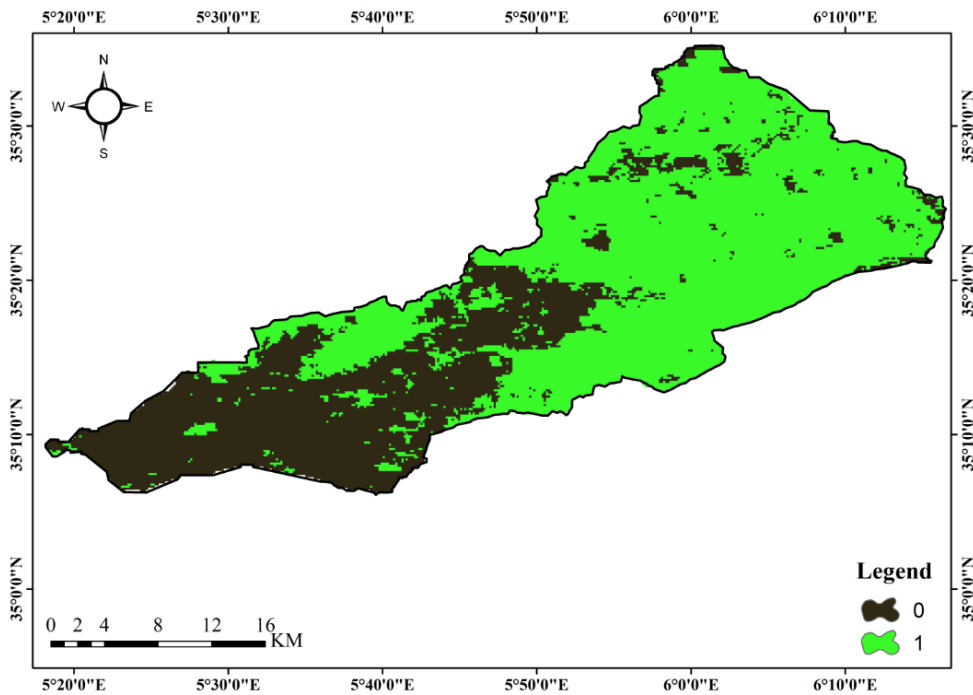
Figure N° 3.5 : Type de sols selon le triangle textural

Pour exploiter les deux triangles (figures 3.4 et 3.5), nous avons besoin de cartes représentant les pourcentages d'argile, de sable et de limon. Parmi les cartes élaborées, on peut citer les suivantes :

Les cartes classées des différents pourcentages d'argile sont les suivants :



**Figure 3.6 : Carte d'argile (pourcentage en 10 et 20)**



**Figure 3.7 : Carte d'argile (pourcentage en 20 et 27.5)**

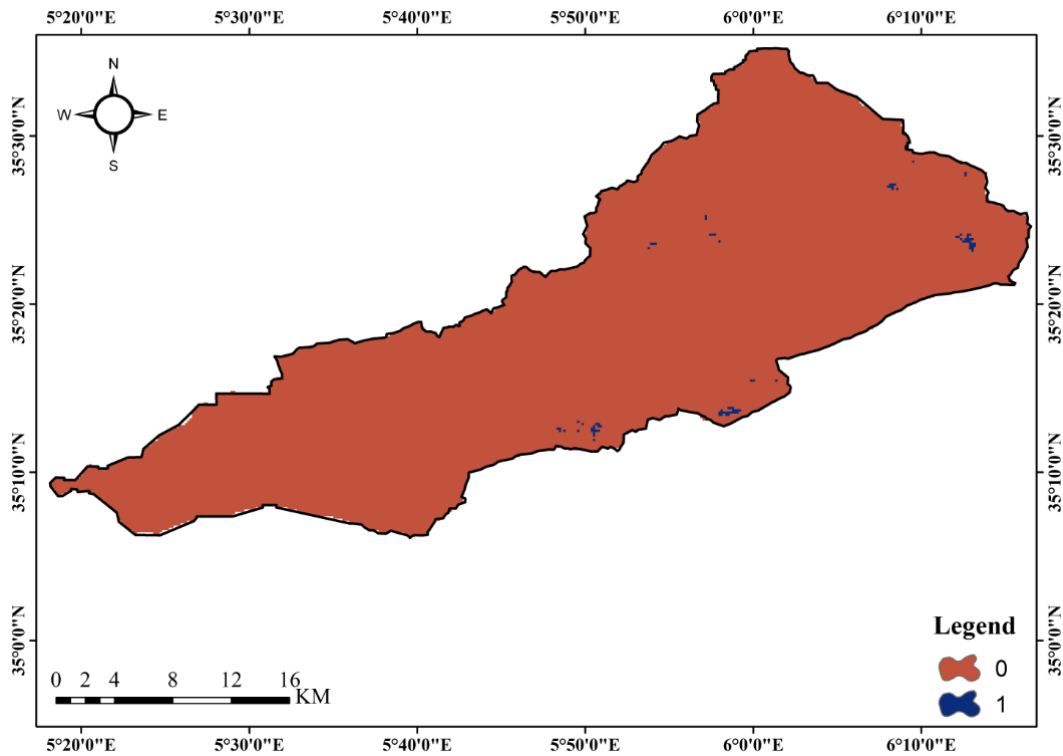


Figure 3.8 : Carte d'argile (pourcentage en 27.5 et 35)

✓ Code de la classe de perméabilité (b) du sol

La carte du code de perméabilité b a été élaborée en s'appuyant sur une combinaison de données pédologiques et topographiques, notamment la texture du sol, sa teneur en argile, sa structure et sa profondeur. Ces informations ont été extraites principalement à partir de la base de données mondiale SoilGrids, qui fournit des estimations continues des propriétés du sol à différentes profondeurs. Le code b permet de caractériser le degré de perméabilité des différentes unités pédologiques du bassin versant, en identifiant les zones où l'infiltration de l'eau est facilitée ou, au contraire, limitée. Il constitue ainsi un indicateur essentiel pour comprendre les dynamiques d'infiltration et de ruissellement, et pour localiser les secteurs à risque d'imperméabilisation ou d'érosion.

Table 3.2: Soil permeability code based on soil texture class

Soil Texture	Permeability Code <sup>1</sup>	Hydrologic Soil Group <sup>2</sup>
Heavy clay, Clay	6	D
Silty clay loam, Sandy clay	5	C-D
Sandy clay loam, Clay loam	4	C
Loam, Silt loam	3	B
Loamy sand, Sandy loam	2	A
Sand	1	A+

Note: 1 – National Soil Handbook (SCS, 1983)  
 2 – National Engineering Handbook (SCS, 1972)

Table 3.3: Soil Layer for Soil Series in Malaysia

Texture Layer	Soil Layer Depth (m)
A (Surface soil)	0.00 – 0.50
B (Subsoil)	0.51 – 1.00
C (Substratum)	1.01 – 1.50

Le tableau 3.3 présente les caractéristiques des différentes couches de sol à considérer pour l'estimation du facteur K sur un site donné. De manière générale, les valeurs du facteur K associées à la couche a sont utilisées lorsque le sol est en état naturel, c'est-à-dire non perturbé par des activités humaines. En revanche, pour les sites soumis à des interventions mécaniques, comme les chantiers de construction, ce sont les valeurs correspondant à la couche b qui sont retenues, car ces couches, mises à nu par les travaux, sont plus susceptibles de subir des pertes en sol dues à l'érosion.

**Figure 3.4** : Degré de perméabilité en fonction du code de la perméabilité b

Degré de perméabilité	Code de perméabilité b <sub>p</sub>
Rapide	1
Modérée à rapide	2
Modérée	3
Modérée à lente	4
Lente	5
Très lente	6

Le traitement du triangle présenté dans la figure 3.4 a été réalisé à l'aide du logiciel ArcGIS, en suivant l'algorithme décrit dans le tableau 3.5.

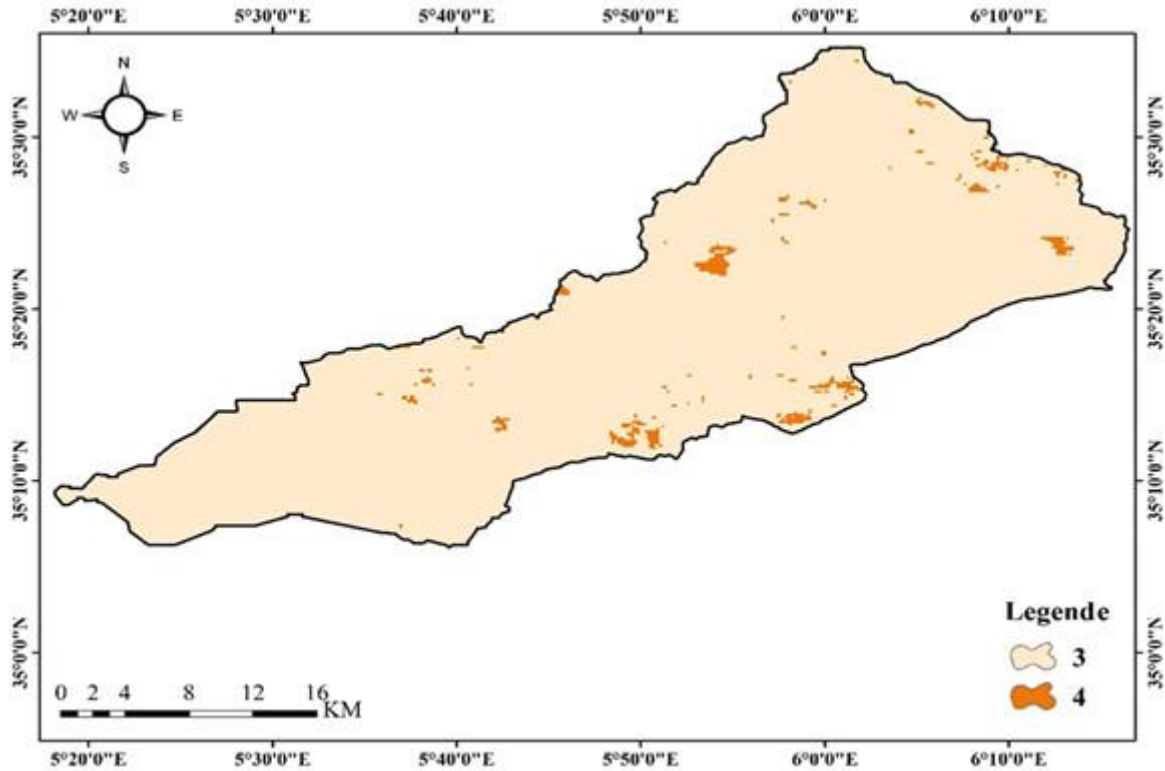
**Figure 3.5 :** Algorithme pour la détermination du code de la perméabilité b (BERGHOUT Ai 2020)

Cas	Classe	% Sable	% Argile	condition	Code Perméabilité
1	1_1	$X < 7$	$Y < 13$		4
2	1_2	$X < 7$	$13 < Y < 27$		3
3	1_3	$X < 7$	$27 < Y < 40$		4
4	1_4	$X < 7$	$40 < Y < 60$		5
5	1_5	$X < 7$	$Y > 60$		6
6	2_1_1	$7 < X < 20$	$Y < 13$	C1	4
7	2_1_2	$7 < X < 20$	$Y < 13$	C2	3
8	2_2	$7 < X < 20$	$13 < Y < 27$		3
9	2_3	$7 < X < 20$	$27 < Y < 40$		4
10	2_4	$7 < X < 20$	$40 < Y < 60$		5
11	2_5	$7 < X < 20$	$Y > 60$		6
12	3_1	$20 < X < 25$	$Y < 27$		3
13	3_2	$20 < X < 25$	$27 < Y < 40$		4
14	3_3	$20 < X < 25$	$40 < Y < 60$		5
15	3_4	$20 < X < 25$	$Y > 60$		6
16	4_1	$25 < X < 43$	$Y < 27$		3
17	4_2	$25 < X < 43$	$27 < Y < 40$		4
18	4_3	$25 < X < 43$	$40 < Y < 60$		5
19	4_4	$25 < X < 43$	$Y > 60$		6
20	5_1_1	$43 < X < 45$	$Y < 7$	C3	3
21	5_1_2	$43 < X < 45$	$Y < 7$	C4	2
22	5_2	$43 < X < 45$	$7 < Y < 27$		3
23	5_3	$43 < X < 45$	$27 < Y < 40$		4
24	5_4	$43 < X < 45$	$Y > 40$		5
25	6_1_1	$45 < X < 50$	$Y < 7$	C3	3
26	6_1_2	$45 < X < 50$	$Y < 7$	C4	2
27	6_2	$45 < X < 50$	$7 < Y < 37$		3
28	6_3	$45 < X < 50$	$Y > 37$		4
29	7_1	$50 < X < 53$	$Y < 7$		2
30	7_2	$50 < X < 53$	$7 < Y < 37$		3
31	7_3	$50 < X < 53$	$Y > 37$		4
32	8_1	$53 < X < 70$	$Y < 20$		2
33	8_2	$53 < X < 70$	$20 < Y < 37$		3
34	8_3	$53 < X < 70$	$Y > 37$		4
35	9_1_1	$70 < X < 85$	$Y < 15$		1
36	9_1_2	$70 < X < 85$	$Y < 15$		2
37	9_2	$70 < X < 85$	$15 < Y < 20$		2
38	9_3	$70 < X < 85$	$Y > 20$		3
39	10	$X > 85$			1

Avec :

C1 :  $X+Y \leq 20$      ;     C2 :  $X+Y > 20$  ;

C3 :  $X+Y \leq 50$      ;     C4 :  $X+Y > 50$  ;



**Figure 3.9 : Carte du code b**

**Tableau 3.4:** Codification de la perméabilité du sol ( $b_p$ ) (Wischmeier et Smith, 1978)

Nous constatons une nette dominance du code  $b = 3$ , qui représente 98,38 %, suivi du code  $b = 4$ , avec 1,62 %. Cela indique une perméabilité globalement modérée à moyennement faible du sol.

### **3.3. Carte de la perméabilité du sol :**

À la suite de l'intégration des informations issues des différentes cartes thématiques (argile, sable, codes structuraux), et conformément aux règles de classification pédologique établies par les références internationales telles que la FAO et l'USDA, une carte finale de la perméabilité des sols a été élaborée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8.

Dans cette étape, chaque unité de sol a été attribuée à une classe de perméabilité en fonction de sa texture et de sa structure. Quatre classes ont été retenues, reflétant la capacité du sol à

laisser infiltrer l'eau (Très peu perméable, Peu perméable, Perméable à peu perméable, Forte Perméable).

**Tableau 3.6:** Type de sols

Type de sol	Composition	Classe de perméabilité	k (m/s) estimé	Observation
<b>Limon-argileux</b>	Riche en limons et argiles	Très peu perméable	$10^{-9}$ à $10^{-7}$ m/s	Argile diminue fortement la perméabilité, structure serrée
<b>Limon-argileux-sableux</b>	Mélange équilibré avec un peu de sable	Peu perméable	$10^{-7}$ à $10^{-6}$ m/s	Le sable améliore le drainage, mais reste freiné par l'argile
<b>Limon équilibré</b>	Proportions relativement égales	Perméable à peu perméable	$10^{-6}$ à $10^{-5}$ m/s	Bonne structure, mais pas aussi drainant qu'un sol sableux
<b>Limon-sableux</b>	Riche en sable, faible en argile	Perméable	$10^{-5}$ à $10^{-4}$ m/s	Sable augmente la porosité, donc meilleure infiltration

Chaque classe est représentée par un code numérique de 1 à 4, traduisant de manière hiérarchique le potentiel d'infiltration des sols. La figure 3.6 illustre la carte synthétique obtenue, mettant en évidence la distribution spatiale des différentes classes de perméabilité à travers l'ensemble de la zone d'étude.

L'exploitation du triangle de la figure 3.5 à l'aide d'outils informatiques s'avère très difficile, voire impossible. C'est pourquoi nous avons construit le triangle rectangle 3.10 à partir de celui-ci, en appliquant des transformations géométriques.

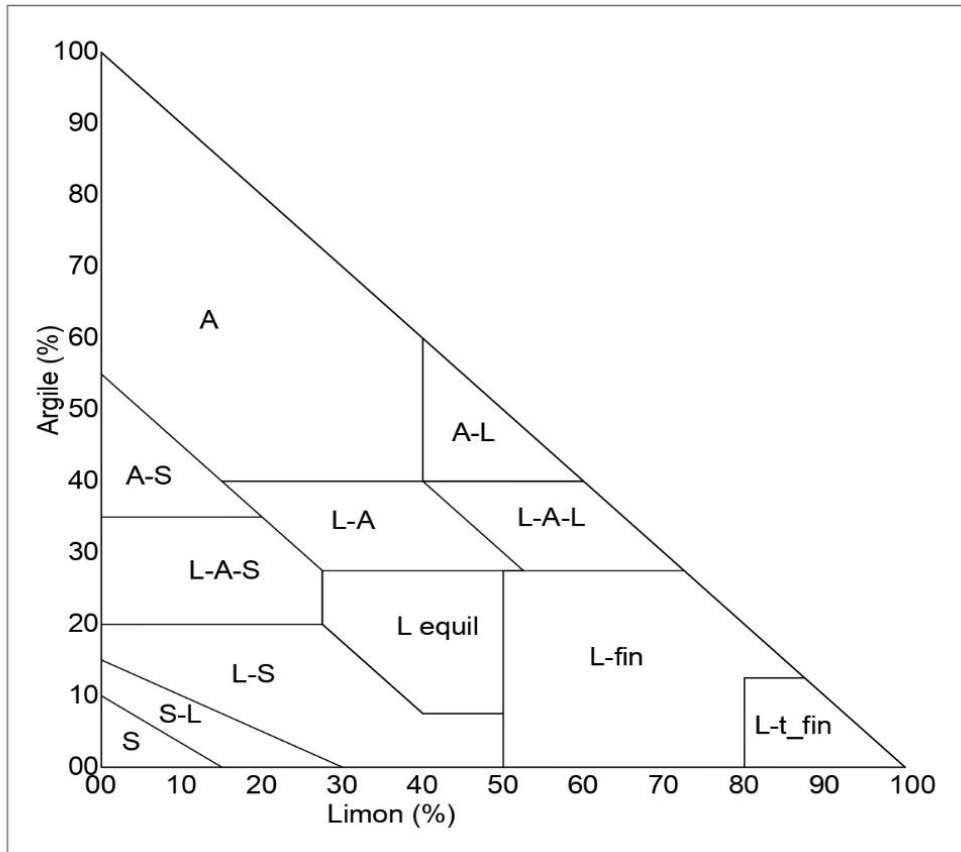


Figure 3.10 : Triangle des textures (figure 3.2 modifiée par des transformations géométriques) du sol indiquant les classes texturales selon les proportions d'argile et de sable

**Légende :**

- A : Argile ;
- A-S : Argile sableux ;
- A-L : Argile limoneux ;
- L-A : Limon argileux ;
- L-A-L : Limon-Argileux limoneux ;
- L-A-S : Limon-Argileux argileux ;
- S-L : Sable Limoneux ;
- L-fin : Limon fin ;
- L equil : Limon (équilibré) ;
- L-S : Limon sableux ;

S : Sable ;

L-t\_fin : Limon très fin ;

Le traitement de la figure 3-3 par ArcGis a été élaboré en suivant l'algorithme suivant : (tableau 3.5)

- **Algorithme pour l'identification des types de sols**

L'algorithme présenté permet l'identification des types de sols en se basant sur les pourcentages relatifs d'argile (Y) et de limon (Z). Il divise les sols en différentes classes selon des plages spécifiques de valeurs pour ces deux composantes

**S : Sable**

**L : Limon**

**A : Argile**

Classe 1-1  $Y \leq 7,5 ; Z \leq 15 ;$  Condition 1

Classe 1-2  $Y \leq 7,5 ; Z \leq 15 ;$  Condition 2

Classe 1-3  $Y \leq 7,5 ; 15 < Z \leq 30 ;$  Condition 3

Classe 1-4  $Y \leq 7,5 ; 15 < Z \leq 30 ;$  Condition 4

Classe 1-5  $Y \leq 7,5 ; 30 < Z \leq 50$

Classe 1-6  $Y \leq 7,5 ; 50 < Z \leq 80$

Classe 1-7  $Y \leq 7,5 ; 80 < Z$

Classe 2-1  $7,5 < Y \leq 10 ; Z \leq 3,75 ;$  Condition 1

Etc .....

**Tableau 3.7:** Algorithme pour l'identification des types de sols (BERGHOUT Ali 2020)

CAS	Classe	Y (argile)	Z(limon)	Conditions	Sol
1	1-1	$Y \leq 7,5$	$Z \leq 15$	C1	S
2	1-2	$Y \leq 7,5$	$Z \leq 15$	C2	S-L
3	1-3	$Y \leq 7,5$	$15 < Z \leq 30$	C3	S-L
4	1-4	$Y \leq 7,5$	$15 < Z \leq 30$	C4	L-S
5	1-5	$Y \leq 7,5$	$15 < Z \leq 30$	/	L-S
6	1-6	$Y \leq 7,5$	$30 < Z \leq 80$	/	L-fin
7	1-7	$Y \leq 7,5$	/	/	L-t_fin

8	2-1	$7,5 < y \leq 10$	$Z \leq 3,75$	C1	S
9	2-2	$7,5 < y \leq 10$	$Z \leq 3,75$	C2	S-L
10	2-3	$7,5 < y \leq 10$	$3,75 < Z \leq 10$		S-L
11	2-4	$7,5 < y \leq 10$	$10 < Z \leq 15$	C3	S-L
12	2-5	$7,5 < y \leq 10$	$10 < Z \leq 15$	C4	L-S
13	2-6	$7,5 < y \leq 10$	$15 < Z \leq 37,5$	/	L-S
14	2-7	$7,5 < y \leq 10$	$37,5 < Z \leq 40$	C5	L-S
15	2-8	$7,5 < y \leq 10$	$37,5 < Z \leq 40$	C6	Lequil
16	2-9	$7,5 < y \leq 10$	$40 < Z \leq 50$	/	Lequil
17	2-10	$7,5 < y \leq 10$	$50 < Z \leq 80$	/	L-fin
18	2-11	$7,5 < y \leq 10$	/	/	L-t_fin
19	3-1	$10 < y \leq 12,5$	$Z \leq 5$	/	S
20	3-2	$10 < y \leq 12,5$	$5 < Z \leq 10$	C3	S
21	3-4	$10 < y \leq 12,5$	$5 < Z \leq 10$	C4	L-S
22	3-5	$10 < y \leq 12,5$	$10 < Z \leq 35$		L-S
23	3-6	$10 < y \leq 12,5$	$35 < Z \leq 37,5$	C5	L-S
24	3-7	$10 < y \leq 12,5$	$35 < Z \leq 37,5$	C6	Lequil
25	3-8	$10 < y \leq 12,5$	$37,5 < Z \leq 50$	/	Lequil
26	3-9	$10 < y \leq 12,5$	$50 < Z \leq 80$	/	L-fin
27	3-10	$10 < y \leq 12,5$	/	/	L-t_fin
28	4-1	$12,5 < y \leq 15$	$Z \leq 5$	C3	S-L
29	4-2	$12,5 < y \leq 15$	$Z \leq 5$	C4	L-S
30	4-3	$12,5 < y \leq 15$	$5 < Z \leq 32,5$	/	L-S
31	4-4	$12,5 < y \leq 15$	$32,5 < Z \leq 35$	C5	L-S
32	4-5	$12,5 < y \leq 15$	$32,5 < Z \leq 35$	C6	Lequil
33	4-6	$12,5 < y \leq 15$	$35 < Z \leq 50$	/	Lequil

34	4-7	12,5<y≤15	/	/	L-fin
35	5-1	15<y≤20	Z ≤27,5	/	L-S
36	5-2	15<y≤20	27,5<Z≤ 32,5	C5	L-S
37	5-3	15<y≤20	27,5<Z≤ 32,5	C6	Lequil
38	5-4	15<y≤20	35<Z≤ 50	/	Lequil
39	5-5	15<y≤20	/	/	L-fin
40	6-1	20<y≤30	Z ≤27,5	/	L-A-S
41	6-2	20<y≤30	27,5<Z≤ 50	/	Lequil
42	6-3	20<y≤30	/	/	L-fin
43	7-1	30<y≤35	Z ≤20	/	L-A-S
44	7-2	30<y≤35	20<Z≤ 27,5	C7	L-A-S
45	7-3	30<y≤35	20<Z≤ 27,5	C8	L-A
46	7-4	30<y≤35	27,5<Z≤ 45	/	L-A
47	7-5	30<y≤35	45<Z≤ 52,5	C9	L-A
48	7-6	30<y≤35	45<Z≤ 52,5	C10	L-A-L
49	7-7	30<y≤35	/	/	L-A-L
50	8-1	35<y≤40	Z ≤15		A-S
51	8-2	35<y≤40	15<Z≤ 20	C7	A-S
52	8-3	35<y≤40	15<Z≤ 20	C8	L-A
53	8-4	35<y≤40	20<Z≤ 40	/	L-A
54	8-5	35<y≤40	40<Z≤ 45	C9	L-A
55	8-6	35<y≤40	40<Z≤ 45	C10	L-A-L
56	8-7	35<y≤40	/	/	L-A-L
57	9-1	40<y≤55	Z ≤15	C7	A-S
58	9-2	40<y≤55	Z ≤15	C8	A

59	9-3	40<y≤55	15<Z≤ 40	/	A
60	9-4	40<y≤55	/	/	A-L
61	10-1	55<y≤60	15<Z≤ 40	/	A
62	10-2	55<y≤60	/	/	A-L

Avec :

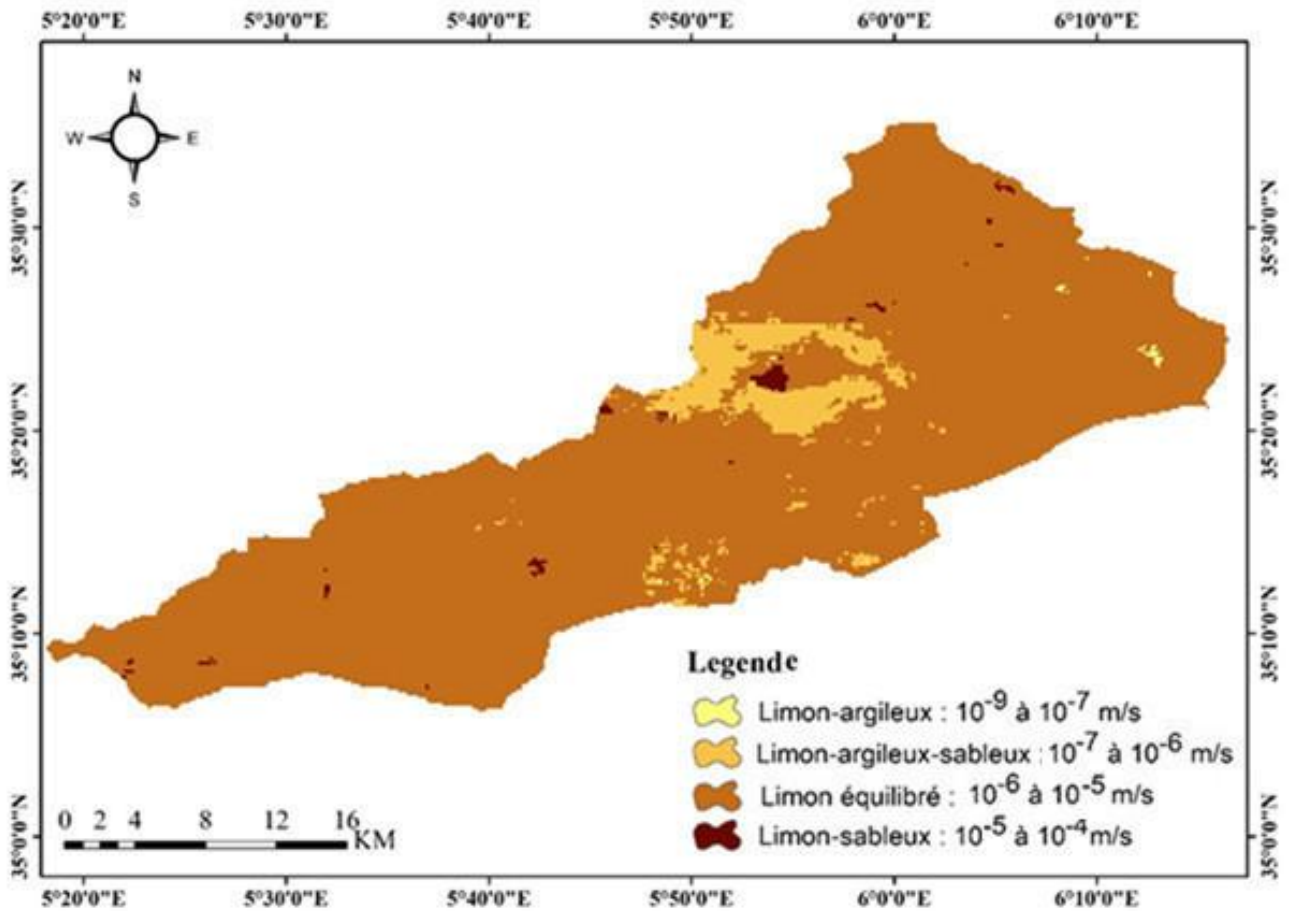
C1 : 10/15 z+Y ≤ 10      ;      C2 : 10/15 z+Y > 10 ;

C3 : 15/30 z+Y ≤ 15      ;      C4 : 15/30 z+Y > 15 ;

C5 : z+Y ≤ 47.5      ;      C6 : z+Y > 47.5 ;

C7 : z+Y ≤ 55      ;      C8 : z+Y > 55 ;

C9 : z+Y ≤ 80      ;      C10 : z+Y > 80 ;



**Figure 3.11 : Carte de Type de sols**

L'analyse spatiale de cette carte révèle une variabilité marquée de la perméabilité des sols :

La majeure partie du bassin versant présente une perméabilité relativement modérée, ce qui reflète un équilibre entre infiltration et ruissellement. Une zone centrale du bassin montre une perméabilité faible, liée principalement à une teneur en argile considérable et une structure stratifiée du sol. En revanche, les zones à forte perméabilité sont quasiment absentes, ce qui suggère une faible présence de sols sableux ou très poreux dans la région.

Cette cartographie constitue un outil stratégique pour l'évaluation du comportement hydrologique des sols. Elle permet d'identifier les zones vulnérables au ruissellement ou à l'érosion, et peut orienter efficacement les actions de gestion durable des terres et de prévention des risques naturels.

### **3.4. Conclusion :**

L'élaboration de la carte de la perméabilité des sols a permis de mettre en évidence la diversité texturale et structurale des sols dans la zone d'étude, et d'en déduire leur capacité relative à permettre l'infiltration de l'eau. En s'appuyant sur les données issues de la plateforme SoilGrids et leur traitement sous ArcGIS 10.8, plusieurs couches ont été analysées, notamment la teneur en argile, en limon et en sable, ainsi que des informations structurelles secondaires.

Les résultats indiquent une prédominance du code  $b = 3$ , représentant 98,38 % des cas, suivi du code  $b = 4$  avec 1,62 %. Les sols majoritairement présents sont des limons équilibrés (93,19 %), caractérisés par une perméabilité modérée (coefficient de perméabilité  $k$  compris entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$  m/s). Ils sont suivis, dans une moindre mesure, par les sols limono-argileux sableux (6,04 %), limono-argileux (0,60 %), puis limono-sableux (0,17 %).

Les figures 3.9 et 3.11 présentées mettent en relation le type de sol, sa composition texturale, la classe de perméabilité attribuée, ainsi qu'une estimation quantitative du coefficient de perméabilité  $k$ . Cette approche permet non seulement une lecture qualitative de la carte, mais également une interprétation hydrologique plus précise, utile pour la gestion des ressources en eau, la prévention de l'érosion et l'aménagement du territoire.

De manière générale, la zone d'étude présente une perméabilité modérée, avec quelques secteurs plus imperméables localisés au centre du bassin. Les zones à haute perméabilité sont très limitées, ce qui souligne l'importance de considérer ces résultats dans toute planification liée à la gestion des eaux pluviales ou à la vulnérabilité aux inondations.

## **Conclusion Générale :**

La présente étude, consacrée à la cartographie de la perméabilité des formations superficielles du sol dans le bassin versant de l'Oued El Hai, a permis de mettre en évidence l'importance de l'analyse spatiale des caractéristiques pédologiques dans la compréhension des processus hydrologiques. Deux indicateurs ont été mobilisés à cet effet : l'indice de perméabilité K et le code b, qui traduit la capacité d'infiltration des sols en fonction de leur texture, de leur structure et de leur porosité.

L'élaboration de la carte de la perméabilité des sols a mis en lumière la diversité texturale et structurale des sols dans la zone d'étude, et a permis d'en déduire leur capacité relative à permettre l'infiltration de l'eau. En s'appuyant sur les données issues de la plateforme SoilGrids et leur traitement sous ArcGIS 10.8, plusieurs couches ont été analysées, notamment la teneur en argile, en limon et en sable, ainsi que des informations structurelles secondaires.

Les résultats indiquent une prédominance du code b = 3, représentant 98,38 % des cas, suivi du code b = 4 avec 1,62 %. Les sols majoritairement présents sont des limons équilibrés (93,19 %), caractérisés par une perméabilité modérée (coefficient de perméabilité k compris entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$  m/s). Ils sont suivis, dans une moindre mesure, par les sols limono-argileux sableux (6,04 %), limono-argileux (0,60 %), puis limono-sableux (0,17 %).

Les figures 3.9 et 3.11 présentées mettent en relation le type de sol, sa composition texturale, sa composition texturale, la classe de perméabilité attribuée et l'estimation quantitative du coefficient k, offrant ainsi une lecture à la fois qualitative et quantitative de la situation.

La cartographie a également révélé que la zone d'étude présente globalement une perméabilité modérée, avec quelques secteurs plus imperméables concentrés au centre du bassin. Les zones à haute perméabilité sont très limitées, ce qui souligne l'importance de

### *Conclusion Générale*

---

considérer ces résultats dans toute planification liée à la gestion des eaux pluviales, la vulnérabilité aux inondations ou encore la lutte contre l'érosion hydrique.

Les cartes produites constituent donc un outil d'aide à la décision précieux pour les gestionnaires du territoire, en appui à la planification de l'aménagement, la conservation des sols et la préservation des ressources en eau dans un contexte semi-aride. Enfin, cette approche peut être perfectionnée dans le futur par des campagnes de vérification sur terrain, l'intégration de données climatiques dynamiques ou encore l'élargissement à d'autres bassins similaires afin de comparer les dynamiques pédohydrologiques à différentes échelles.

### Références bibliographiques:

1. **Wischmeier, W.H., & Smith, D.D.** (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. USDA Agriculture Handbook No. 537. Washington, D.C.
2. **FAO (Food and Agriculture Organization)**. (2006). *Guidelines for soil description*. 4th edition. Rome, Italy.
3. **Hengl, T., de Jesus, J.M., Heuvelink, G.B.M., Gonzalez, M.R., Kilibarda, M., Blagotić, A., et al.** (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
4. **Bou Kheir, R., Shaban, A., Abdallah, C., & Darwish, T.** (2008). Use of remote sensing and GIS for assessing soil erosion in Lebanese coastal watersheds. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 698–707.
5. **Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C.** (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), 91–133.
6. **Ziadat, F.** (2007). Soil erosion and sedimentation modeling using GIS in the Hashemite Kingdom of Jordan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62(6), 390–399.
7. **Morgan, R.P.C.** (2005). *Soil Erosion and Conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing.
8. **Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L.** (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48, 38–50.
9. **Benchetrit, A., et al.** (2019). Caractérisation hydrogéologique et cartographie des unités de perméabilité dans un bassin semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(1), 17–34.
10. **Chaker, M., & Remini, B.** (2014). L'érosion hydrique en Algérie: État des lieux et perspectives. *Revue Sécheresse*, 25(1), 49–58.
11. **Berghout A. (2020)** Guide pour l'élaboration du facteur K Université de M'sila Algérie