



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE

Faculté des Sciences et Techniques

Béni-Mellal

Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques

Formation Doctorale : **Ressources Naturelles Environnement et santé**

THÈSE

Présentée par

Wafae Nouaim

Pour l'obtention du grade de

Docteur

Spécialité : Géosciences

Option : Géomatique, Modélisation hydrologique et télédétection

***Etude de l'applicabilité du modèle d'érosion hydrique **RUSLE** à deux contextes hétéroclites :
Le Haut Atlas Central marocain
et la région française Nord-Pas-De-Calais***

Soutenue le 17/ 05 /2022 à 10 h devant les membres du jury :

Pr. Abderrahmene EL Ghmari	FST Béni Mellal	Président
Pr. El Moustafa Bachaoui	FST Béni Mellal	Rapporteur
Pr. Ahmed Barakat	FST Béni Mellal	Rapporteur
Pr. Karim El Arrim	FST Tanger	Rapporteur
Pr. Mohamed El Baghdadi	FST Béni Mellal	Examineur
Pr. Mohamed Merzouki	FST Béni Mellal	Co-encadrant
Pr. Abderrazak El Harti	FST Béni Mellal	Encadrant
Ing. Abderrahim Ettaqy	ANEF Béni Mellal	Invité

Remerciements

Il faut que le hasard renverse la fourmi pour qu'elle voie le ciel. Après plusieurs années de travail, de nombreux moments de doute et de découragement, la chance m'a fait retrouver et rencontrer les bonnes personnes au bon moment.

Ainsi, l'accomplissement de ce projet de thèse n'a pu se faire qu'avec le concours et le soutien de nombreuses personnes que je tiens à remercier.

En premier lieu, j'adresse mes plus sincères et chaleureux remerciements à mes directeurs de thèse, autant à monsieur Mohamed Merzouki qu'à monsieur Abderrazak El Harti, pour leur disponibilité, leur écoute, ainsi que l'aide technique et scientifique qu'ils m'ont apportée.

Je voudrais exprimer également ma reconnaissance au Doyen et aux Vice-Doyens, ainsi qu'une pensée particulière à monsieur Arif Mustafa de la scolarité de la FST de l'Université Sultan Moulay Slimane. De même, j'étends mes remerciements au département de géologie et à l'équipe administrative de la faculté des sciences de l'université Ibn Tofaïl de Kénitra.

Je remercie vivement tous les membres de jury qui ont consacré de leur temps précieux pour évaluer ce travail. Je nomme ici monsieur El Moustafa Bachaoui, monsieur Ahmed Barakat et monsieur Karim El Arrim rapporteurs de cette thèse, monsieur Mohamed El Baghdadi examinateur de ce travail. Je remercie monsieur Abderrahim Ettaqy d'avoir accepté de participer à ma soutenance. Je remercie également monsieur Abderrahmene EL Ghmari d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants et collègues de la FST, en particulier : monsieur Abdellatif Abbaoui, monsieur Ismail Karaoui, monsieur Abdellah Ouigmane et monsieur Elhoucein Layati et finalement ma chère Mina El Mobaraky.

De l'autre côté de la Méditerranée, je remercie monsieur Jean Prygiel, Mélina Seyman et Cécile Gallian ainsi que plus largement toutes les personnes de l'Agence de l'eau Artois-Picardie ayant collaboré de près ou de loin à la réalisation de la partie française du projet.

Mes remerciements vont également à monsieur Olivier Thibault et madame Christine Dericq sans qui cette partie n'aurait pas pu voir le jour.

Sur le plan personnel, je remercie ma famille, ma belle-famille et mes amis qui, avec cette question récurrente et angoissante "Quand est-ce que tu la soutiens cette thèse ?", m'ont permis d'aller jusqu'au bout de ce travail.

Enfin, j'adresse une pensée affectueuse à mon cher époux Dimitri. Merci pour ton aide à l'accomplissement de ce travail. Notre couple a grandi en même temps que mon projet de thèse, le premier servant de socle solide à l'épanouissement du second.

À la mémoire de monsieur Mohamed Najimi.

Résumé

La lutte contre l'érosion hydrique est un enjeu économique et sociétal important. Réduction du potentiel agronomique des parcelles, coulées boueuses, envasement des barrages sont des conséquences néfastes qui mobilisent agriculteurs, gestionnaires de l'eau, collectivités locales et chercheurs scientifiques. Quasi-ubiquitaire, ce phénomène cause une perte annuelle estimée à 25 milliards de tonnes à l'échelle mondiale. Au Maroc, la moyenne des pertes en sols imputables à l'érosion hydrique dépasse les 10 t/ha/an. Alors que le taux de renouvellement naturel d'un sol se situe autour de 1 t/ha/an, 40 % des terres marocaines subissent une érosion hydrique supérieure à ce seuil. En France, la moyenne des pertes est estimée à seulement 1,5 t/ha/an mais ce phénomène reste une problématique grave en raison d'une forte variabilité spatiale : jusqu'à 20 % du territoire seraient affectés par des taux supérieurs à 1 t/ha/an.

La présente étude s'attache à cartographier et à quantifier les pertes en sols dans deux contextes différents (climatique, topographique, pédologique et agronomique), le bassin versant de l'oued El Abid (Haut-Atlas, Maroc) à l'amont du barrage Bin El-Ouidane d'une part et l'ancienne région Nord-Pas-de-Calais (France) d'autre part, à l'aide d'une méthode commune : l'équation universelle révisée de pertes de sols (RUSLE).

Les résultats obtenus pour le bassin versant de l'oued El Abid aboutissent à un taux d'érosion moyen de 14 t/ha/an, avec 72 % des pertes concentrées sur 21 % de la superficie totale, principalement les hauts reliefs montagneux caractérisés par des taux supérieurs à 20 t/ha/an. Le reste de la superficie (soit 85 %) délivre quant à elle seulement 28 % des pertes en sol. Cette superficie correspond aux plateaux et dépressions.

Dans le Nord-Pas-de-Calais, le taux d'érosion moyen calculé avoisine les 1,3 t/ha/an, surtout en raison d'un relief peu prononcé. Cependant, l'érosion des sols peut être un problème local, en particulier dans un contexte de grandes cultures, avec des taux atteignant 54 t/ha/an dans les zones les plus risquées (collines de l'Artois et des Flandres, au relief plus marqué). Des données précises sur les pratiques agricoles (assolements, couverts intermédiaires) et sur les précipitations ont permis d'effectuer une discrétisation intra-annuelle (saisonnière) de l'érosion, afin, notamment, de prendre en compte le rythme asynchrone des facteurs.

Cette étude croisée de deux zones soumises à des régimes d'érosion très différents aboutit nécessairement à des conclusions qui le sont tout autant. Dans le Nord Pas-de-Calais, l'assolement et les pratiques agricoles au sens large représentent le cœur de cible des actions anti-érosives. Dans le Haut Atlas, les sols sont naturellement soumis à un fort aléa érosif et l'activité humaine y est peu répandue. Les actions se concentrent donc sur le reboisement et le contrôle des activités pastorales (surpâturage).

Mots clés : Erosion hydrique, RUSLE, oued El Abid, Haut Atlas central, Maroc, Nord-Pas-de-Calais, France.

Abstract

The fight against water erosion is an important economic and social issue. Reduction of the agronomic potential of plots of land, mudflows, silting of dams are harmful consequences that mobilize farmers, water managers, local authorities and scientific researchers. This quasi-ubiquitous phenomenon causes an annual loss estimated at 25 billion tons worldwide. In Morocco, the average soil loss due to water erosion exceeds 10 t/ha/year. While the natural renewal rate of a soil is around 1 t/ha/year, 40% of Moroccan land suffers water erosion above this threshold. In France, the average loss is estimated at only 1.5 t/ha/year, but this phenomenon remains a serious problem due to high spatial variability: up to 20% of the territory is affected by rates higher than 1 t/ha/year.

The present study aims at mapping and quantifying soil losses in two different contexts (climatic, topographic, pedological and agronomic), the ouel El Abid watershed (Haut-Atlas, Morocco) on the one hand and the former Nord-Pas-de-Calais region (France) on the other hand, using a common method: the revised universal soil loss equation (RUSLE).

The results obtained for the Wadi El Abid watershed lead to an average erosion rate of 14 t/ha/yr, with 72% of losses concentrated on 21% of the total area, namely the high mountainous reliefs characterized by rates above 20 t/ha/yr. The rest of the area (85%) delivers only 28% of soil losses. This area corresponds to plateaus and depressions.

In the Nord-Pas-de-Calais, the average erosion rate calculated is around 1.3 t/ha/yr, mainly due to the low relief. However, soil erosion can be a local problem, particularly in a context of industrial agriculture, with rates reaching 54 t/ha/year in the most at-risk areas (Artois and Flanders hills, with more pronounced relief). Precise data on agricultural practices (crop rotation, intermediate cover) and on precipitation have made it possible to carry out an intra-annual (seasonal) discretization of erosion, in order to take into account the asynchronous rhythm of the factors.

This cross-study of two areas subject to very different erosion regimes necessarily leads to conclusions that are just as different. In the Nord Pas-de-Calais, crop rotation and agricultural practices in the broad sense of the term represent the core target of anti-erosion actions. In the High Atlas, the soils are naturally subject to a high erosive hazard and human activity is not widespread. Actions are therefore focused on reforestation and control of pastoral activities (overgrazing).

Keywords : Water erosion, RUSLE, Wadi El Abid, Central High Atlas, Morocco, Nord-Pas-de-Calais, France.

ملخص

تعد ظاهرة التعرية المائية قضية اقتصادية ومجتمعية مهمة. إذ أنها تساهم في الحد من الإمكانات الزراعية للحقول. تؤدي هذه الظاهرة إلى خسارة سنوية تقدر بنحو 25 مليار طن على نطاق عالمي. في المغرب، يتجاوز متوسط فقدان التربة المنسوب إلى التعرية المائية إلى 10 طن / هكتار / سنة. في حين أن معدل التجديد الطبيعي للتربة هو حوالي 1 طن / هكتار / سنة. 40% من الأراضي المغربية تعاني من ظاهرة التعرية المائية و في فرنسا، يقدر متوسط الخسارة ب 1.5 طن / سنة فقط، لكن هذه الظاهرة لا تزال مشكلة خطيرة بسبب التباين المكاني العالي: حوالي ما يصل إلى 20% من الأراضي تعاني من هذه الظاهرة بمعدلات تصل إلى أكثر من 1 طن / هكتار / عام.

تركز هذه الدراسة على رسم الخرائط وتقدير خسائر التربة في منطقتين جغرافيتين مختلفتين من حيث (المناخ، الطبوغرافيا، بنية التربة و الفلاحة)، المنطقة الأولى تخص الحوض المائي واد العبيد المتواجد في الأطلس الكبير بالمغرب، أما المنطقة الثانية فتهم Le Nord-Pas-de-Calais بفرنسا. من أجل هذا تم اعتماد المعادلة العالمية المنقحة لخسائر التربة (RUSLE).

النتائج المحصل عليها بالنسبة لمنطقة واد العبيد تصل إلى معدل تآكل و امتلاء السدود بالأوحال وهذا ما جعل الفلاحين، مدبري الماء، الجمعيات الترابية و البحث العلمي تهتم بهذا الموضوع متوسط يقدر ب 14 طن / هكتار / سنة، حيث 72% من الخسائر تنحدر فقط من 15% من إجمالي المساحة، هذه الأخيرة تخص المناطق الجبلية العالية التي تعرف معدل تعرية يصل إلى أكثر من 20 طن / هكتار / سنة. بالنسبة للمساحات المتبقية (85%) فهي تساهم ب 28% فقط من خسائر التربة.

فيما يخص شمال فرنسا، متوسط معدل التآكل يصل إلى حوالي 1.3 طن / ساعة / سنة، هذا المعدل ناتج عن التضاريس المنبسطة في المنطقة، مع ذلك تبقى التعرية المائية مشكل محلي في هذه الجهة خاصة على مستوى الأراضي الفلاحية، حيث يصل معدل التآكل إلى 54 طن / هكتار / سنة على مستوى المناطق الأكثر عرضة لهذه الظاهرة.

هذه الدراسة التبادلية لمنطقتين مختلفتين تؤدي بالضرورة إلى الاستنتاجات و نتائج مختلفة نظرا لظروف كل منطقة. ففي شمال فرنسا، يتم اعتماد أساليب للتقليل من نسبة تآكل التربة كتناوب المحاصيل والمزروعات. أما في الأطلس الكبير، فالترربة جد هشة ومعرضة لمعدلات تعرية عالية ناتجة عن تدهور الغطاء النباتي، لهذا وجب تركيز الجهود على تشجير الأراضي والحد من الرعي الجائر.

الكلمات المفتاحية: التعرية المائية ، معادلة عالمية لتعرية المائية، الحوض المائي واد العبيد ، الأطلس الكبير بالمغرب، شمال فرنسا.

Table des matières

Remerciements	
Résumé	
Abstract.....	
ملخص	
Table des matières.....	
Liste des abréviations.....	
Liste des figures et des tableaux.....	
Liste des photos	
Introduction générale.....	1
Partie 1 : Synthèse bibliographique.....	6
Chapitre 1 : Les sols et l'érosion hydrique.....	6
1. La formation d'un sol	6
2. L'érosion hydrique	7
2.1. Les processus de l'érosion hydrique	8
2.2. Les facteurs de l'érosion hydrique	12
2.3. Les formes d'érosion hydrique.....	14
Chapitre 2 : Approches de quantification de l'érosion hydrique.....	19
1. Approches de quantification de l'érosion hydrique	19
1.1. Mesures directes.....	19
1.2. Mesures indirectes.....	21
2. Approches quantitatives retenues dans l'étude.....	23
2.1. Modèle USLE.....	23
2.2. Modèle RUSLE.....	24
2.3. RUSLE et son adaptation aux cas d'érosion au Maroc	24
Partie 2 : Présentation des zones d'étude et méthodologie	25
Chapitre 1 : Présentation du bassin versant de l'oued El Abid (Maroc)	25
1. Situation géographique.....	25
2. Contexte climatique	27
2.1. Stations pluviométriques	27
2.2. Précipitation	28
2.3. Température	30
2.4. Synthèse bioclimatique	30
3. Contexte morphologique	32
3.1. Le relief	32
3.2. La forme	34

3.3. Les caractéristiques hypsométriques	36
4. Contexte hydrographique	40
4.1. La densité du drainage.....	40
4.2. La hiérarchisation du réseau hydrographique.....	41
5. Contexte géologique.....	42
6. Contexte hydrogéologique.....	45
7. Contexte pédologique	46
8. Occupation des sols.....	47
8.1. Végétation	47
8.2. Pratiques antiérosives	52
Chapitre 2 : Présentation de la région Nord-Pas-de-Calais (France).....	58
1. Situation géographique.....	58
2. Contexte climatique	59
3. Contexte topographique	61
4. Contexte hydrographique	62
5. Contexte géologique.....	63
6. Contexte pédologique	65
7. Végétation et occupation des sols.....	66
Chapitre 3 : Méthodologie et données	68
1. Equation universelle des pertes en sol révisée RUSLE	68
2. Erosivité des pluies (facteur R)	69
3. Erodibilité des sols (facteur K)	70
4. Topographie (facteur LS).....	71
5. Occupation de sol (facteur C)	72
5.1. Bassin versant de l’oued El Abid	72
5.2. Région Nord-Pas-de-Calais.....	73
6. Pratiques antiérosives (facteur P).....	74
7. Synthèse de la méthode.....	74
Partie 3 : Résultats et interprétations.....	76
Chapitre 1 : Erosion du bassin versant de l’oued El Abid	76
1. Résultats des facteurs	76
1.1. Érosivité des pluies	76
1.2. Érodibilité des sols	77
1.3. Occupation du sol.....	79
1.4. Topographie	81
1.5. Pratiques antiérosives	82
2. Evaluation de l’érosion hydrique dans le bassin oued El Abid.....	84

3. Conclusion	87
Chapitre 2 : Erosion de la région Nord-Pas-de-Calais	88
1. Résultats des facteurs	88
1.1. Érodibilité des sols	88
1.2. Occupation du sol.....	89
1.3. Topographie	92
1.4. Érosivité des pluies	93
1.5. Pratiques antiérosives	95
2. Evaluation de l'érosion hydrique dans le Nord-Pas-de-Calais	96
2.1. Saisonnalité et ampleur de l'érosion hydrique	96
2.2. Distribution spatiale et classification de l'érosion hydrique	98
2.3. Estimation du potentiel des techniques de cultures intermédiaires	100
2.4. Avantages et limites de l'étude	100
3. Conclusion	101
Chapitre 3 : Résultats des deux zones et préconisations.....	103
1. Evaluation des résultats des deux zones d'études	103
2. Préconisations spécifiques au bassin versant El Abid.....	105
Conclusion générale	108
Bibliographie	110
Annexes	119

Liste des abréviations

RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation

NPDC : Nord-Pas-de-Calais

ANEF : Agence Nationale des Eaux et Forêts

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

RPG : Registre Parcellaire Graphique

PNABV : Plan National d'Aménagement des Bassins Versants

Liste des figures et des tableaux

Figure 1 : Les horizons d'un sol..... 6

Figure 2 : Processus de l'érosion hydrique 7

Figure 3 : Les stades de formation d'une croûte de battance..... 9

Figure 4 : Mode de transport des particules dans les cours d'eau 11

Figure 5 : Diagramme de Hjulström..... 12

Figure 6 : Dispositif expérimental 20

Figure 7 : Coordonnées de localisation du bassin versant de l'oued El Abid..... 25

Figure 8 : Situation géographique du bassin versant de l'oued El Abid..... 26

Figure 9 : Répartition géographique des stations pluviométriques..... 27

Figure 10 : Répartition spatiale des pluies moyennes annuelles..... 28

Figure 11 : Répartition mensuelle des pluies moyennes annuelles en mm (1991 -2018)..... 29

Figure 12 : Diagrammes de Bagnouls et Gaussen pour les stations de Tillouguit et Sgat..... 31

Figure 13 : Situation des stations climatiques de la zone d'étude dans le digramme d'Emberger 32

Figure 14 : Les grandes unités de relief du bassin versant de l'oued El Abid 34

Figure 15 : Rectangle équivalent du bassin versant d'oued El Abid 35

Figure 16 : Carte des altitudes du bassin versant d'Oued El Abid 36

Figure 17 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued El Abid 38

Figure 18 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued El Abid..... 39

Figure 19 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued El Abid 40

Figure 20 : Classification des cours d'eaux du bassin versant de l'oued El Abid 41

Figure 21 : Coupe géologique et log stratigraphique de la zone d'étude..... 42

Figure 22 : Carte géologique du bassin versant de l'oued El Abid 43

Figure 23 : Perméabilité des formations lithologique du bassin versant 45

Figure 24 : Cartographie des différentes essences du bassin versant de l'oued El Abid 51

Figure 25 : Situation géographique de la région Nord-Pas-de-Calais 58

Figure 26 : Pluviométrie moyenne annuelle en Nord-Pas-de-Calais..... 59

Figure 27 : Précipitation et températures de quelques stations en Nord-Pas de Calais 60

Liste des figures et des tableaux

Figure 28 : Topographie du Nord-Pas-de-Calais.....	61
Figure 29 : Réseau hydrographique du Nord-Pas-de-Calais.....	62
Figure 30 : Carte géologique du Nord-Pas-de-Calais.....	63
Figure 31 : Coupe géologique du Nord-Pas-de-Calais	64
Figure 32 : Carte pédologique du Nord-Pas de Calais.....	65
Figure 33 : Occupation des sols en Nord-Pas-de-Calais.....	67
Figure 34 : Organigramme de la méthodologie appliquée au bassin versant de l'oued El Abid	74
Figure 35 : Organigramme de la méthodologie appliquée au Nord-Pas-de-Calais.....	75
Figure 36 : Érosivité des pluies sur la zone d'étude	76
Figure 37 : Carte d'érodibilité des sols du bassin versant de l'oued El Abid	78
Figure 38 : Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'oued El Abid	79
Figure 39 : Carte du facteur LS du bassin versant de l'oued El Abid.....	81
Figure 40 : Carte des pratiques antiérosive par lutte mécanique	82
Figure 41 : Carte des pertes en sol dans le bassin versant de l'oued El Abid.....	84
Figure 42 : Carte d'érodibilité de sol du Nord-Pas-de-Calais.....	88
Figure 43 : Carte d'occupation des sols.....	89
Figure 44 : Carte du facteur d'occupation de sols	92
Figure 45 : Carte du facteur topographique	93
Figure 46 : Érosivité des pluies dans le Nord-Pas-de-Calais.....	94
Figure 47 : Carte d'érosivité des pluies par saison dans le Nord-Pas-De-Calais	95
Figure 48 : Carte des pertes en sol par saison dans le Nord-Pas-de-Calais	96
Figure 49 : Cycles d'influence annuelle de chaque paramètre RUSLE sur les pertes en sol.....	97
Figure 50 : Pertes en sol annuelle et comparaison avec les résultats de l'ESDAC.....	98
Figure 51 : Répartition des facteurs RUSLE (à gauche, oued El Abid ; à droite, Nord Pas-de-Calais)	103
Tableau 1 : Type de bioclimat au niveau du bassin versant de l'oued El Abid	30
Tableau 2 : Répartition des tranches d'altitude en fonction de leurs surfaces	36
Tableau 3 : Répartition des classes de pentes en fonction de la superficie du bassin versant	39
Tableau 4 : Les bandes spectrales Sentinel 2.....	72
Tableau 5 : Valeurs de l'indice d'érodibilité des formations.....	77
Tableau 6 : Valeurs de l'indice d'occupation de sol.....	79
Tableau 7 : Valeurs du facteur C pour chaque classe d'occupation de sols	90
Tableau 8 : Érosivité des pluies par saison et par an	95
Tableau 9 : Pertes en sol par type de culture	99
Tableau 10 : Résultat du scénario d'extension des cultures intermédiaires.....	100

Liste des photos

Photo 1 : Effet splash (à gauche) et croûte de battance (à droite).....	8
Photo 2 : Erosion en nappe.....	15
Photo 3 : Erosion en rigole.....	16
Photo 4 : Exemple d'érosion hydrique en ravines dans la zone d'étude.....	17
Photo 5 : Déplacement progressif du sol vers le bas de la pente par les machines agricoles.....	18
Photo 6 : Erosion par sapement de berges.....	18
Photo 7 : Chênaies vertes dans le bassin versant de l'oued El Abid.....	47
Photo 8 : Genévriers rouge (gauche) et thurifère (droite).....	48
Photo 9 : Pins d'Alep dans la zone d'étude.....	49
Photo 10 : Cèdre d'Atlas.....	49
Photo 11 : Thuya de Berbérie.....	50
Photo 12 : Envasement du barrage Bin El Ouidane.....	52
Photo 13 : Cordons en pierres sèche le bassin versant de l'oued El Abid.....	53
Photo 14 : Seuils en gabion à l'aval du barrage Bin El Ouidane.....	54
Photo 15 : Seuil en maçonnerie dans le sous bassin versant oued Ahnçal.....	54
Photo 16 : Bandes de cultures dans le bassin versant de l'oued El Abid.....	55
Photo 17 : Reboisement du cèdre de l'Atlas, amont de l'oued El Abid.....	56
Photo 18 : Plantation forestière de cyprès de l'Atlas dans le bassin versant de l'oued El Abid.....	56
Photo 19 : Plantation forestière cyprès d'Arizona dans le bassin versant de l'oued El Abid.....	57
Photo 20 : Combinaison des corrections mécanique et biologique.....	57
Photo 21 : Culture maraîchère au long d'un tronçon de cours d'eau.....	80
Photo 22 : Couverture neigeuse dans les hautes montagnes (fin du printemps).....	81
Photo 23 : Photo de quelque pratique antiérosive (terrassment) de la zone d'étude.....	83
Photo 24 : Effet de l'érosivité des pluies sur les sols nus et formation de la couche de battance.....	85
Photo 25 : Sapement de berge, cours d'eau oued El Abid.....	86
Photo 26 : Couverture végétale herbacée.....	119
Photo 27 : Couvert végétal dense dans le bassin versant.....	119
Photo 28 : Couvert végétal éparse dans le bassin versant.....	119
Photo 29 : Couvert végétal dégradé dans le bassin versant.....	120
Photo 30 : Couvert végétal très dégradé dans le bassin versant.....	120
Photo 31 : Terrain dénudé suite au processus érosif.....	120
Photo 32 : Effet du ruissellement et de l'érosion hydrique.....	121
Photo 33 : Effet splash sur les sols nu et formation de la couche de battance.....	121
Photo 34 : Effet protecteur de la végétation sur les sols.....	121
Photo 35 : Sédiments emportés par l'oued El Abid.....	122
Photo 36 : Affleurement des couches géologiques (roche mère).....	123

Introduction générale

Contexte général

L'érosion hydrique est l'une des principales formes de dégradation des sols. Ce terme désigne l'ensemble des processus de détachement, de transport et de sédimentation intervenant à la surface du sol à différentes échelles d'espace et de temps [1], du ruissellement à la rigole jusqu'aux profondes ravines qui entaillent les parcelles. Les principaux facteurs influençant l'érosion sont la pluviométrie, la pédologie, la topographie, l'occupation des sols et, dans un contexte agricole, les pratiques culturales.

Incidemment, le développement de l'agriculture productiviste a largement contribué à accélérer la dégradation des ressources en eau et en sol [2]. Chaque année d'importantes quantités de sols sont déplacées, en particulier dans les parcelles agricoles laissées à nu lors des forts épisodes pluvieux. En sus, chaque perte successive de couche arable aggrave la sensibilité du sol à l'érosion : l'appauvrissement en matière organique, concentrée dans les premiers centimètres du sol, fragilise la structure du sol, lui faisant de plus perdre en potentiel agronomique. Cette diminution de fertilité impose aux agriculteurs l'adoption de mesures de correction et l'emploi d'engrais afin de garder la capacité productive du sol [3].

Par ailleurs, les eaux de ruissellement et les sédiments détachées peuvent être une source de pollution des cours d'eau par les dérivés azotés (ammonium, nitrates et nitrites) et phosphorés [4], ce qui provoque des dommages importants sur l'habitat aquatique en modifiant l'équilibre trophique de l'écosystème. Les sédiments déplacés peuvent détériorer les aménagements sur les cours d'eau et les côtes, affectant les activités de navigation (colmatage des canaux) ainsi que les systèmes de stockage (barrages, étangs, réservoirs). Ce transfert de sédiments est aussi à l'origine des dégâts en dehors des cours d'eau, avec des inondations boueuses parfois violentes et des atterrissements sur les voiries.

Enfin, une des dimensions cruciales de la problématique de l'érosion réside dans le fait que le sol n'est pas une ressource renouvelable à l'échelle de temps humaine [5] [6] [7].

A l'échelle mondiale, les pertes annuelles en terres du fait de l'érosion hydrique sont estimées à 25 milliards de tonnes. A l'échelle européenne, l'érosion hydrique affecte 26 millions d'hectares soit 17 % du territoire avec une perte moyenne estimée de 1,2 t/ha/an [8].

En France le taux d'érosion est estimé en moyenne à 1,5 t/ha/an mais peut dépasser les 10 t/ha/an dans les zones de grandes cultures.

Objectif de la thèse

L'objectif du présent travail est d'étudier quantitativement l'état de dégradation des sols dans deux contextes drastiquement différents, du point de vue climatique, topographique, pédologique et agronomique. Afin de déterminer et comparer les paramètres amplificateur et accélérateur de la dégradation des sols, la méthodologie utilisée est commune aux deux contextes, à savoir l'équation universelle révisée de pertes de sols RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

De façon plus spécifique, le contenu de cette recherche répondra aux questions suivantes :

- Quelle est la répartition et l'ampleur géographique du phénomène de l'érosion hydrique dans les deux zones d'étude ?
- Quel est le potentiel érosif dans une zone à système agricole productiviste ?
- Quel est le potentiel érosif dans une zone semi-aride à couvert végétal dégradé ?
- Quelle est la variabilité spatiale du taux des sols dégradés dans chaque contexte ?
- Quelles sont les paramètres accélérateurs de l'érosion hydrique dans chaque contexte ?
- Quel est l'impact de la couverture intégrale sur l'érosion hydrique dans un contexte agricole ?
- Quelle sont les avantages et limites du modèle RUSLE pour la quantification du potentiel érosif ?

Zones d'étude

Une des zones d'étude se situe au Maroc. Ce pays du Nord-Ouest de l'Afrique vit depuis les 30 dernières années l'épisode le plus sec de son histoire contemporaine. Dans cette région et plus particulièrement dans les montagnes du Haut Atlas, la croissance du couvert végétal est limitée par l'action conjointe des températures élevées et du déficit hydrique. Cette situation engendre des écosystèmes vulnérables aux processus de dégradation des sols par érosion hydrique [9]. L'analyse du problème à l'échelle nationale montre que 12,5 millions d'hectares de terres de culture et de parcours sont réellement menacés par l'érosion hydrique [10]. Selon la FAO [11], 40% des terres au Maroc sont affectées par l'érosion hydrique. La dégradation spécifique dépasse 20 t/ha/an dans les versants du Rif et entre 5 et 10 t/ha/an dans les Moyen et Haut Atlas.

Par conséquent, les grands barrages au Maroc reçoivent environ 50 millions de tonnes de sédiments par année ce qui réduit leur capacité de stockage d'eau d'environ 0,5 % par année [12]. Cet envasement des barrages engendre des effets négatifs dans la production de l'énergie électrique et dans l'approvisionnement en eau potable et d'irrigation (perte d'un volume per-

mettant l'irrigation de 10 000 ha/an). Cette situation engendre *in fine* l'augmentation des frais de fonctionnement et de gestion (barrages, usines hydro-électriques, traitement des eaux).

Dans le contexte de l'effort national pour caractériser et combattre le phénomène d'érosion, une partie de la présente thèse se focalise sur l'étude du bassin versant de l'oued El-Abid, à l'amont du barrage Bin El-Ouidane.

La seconde zone englobe l'ancienne région administrative du Nord-Pas-de-Calais, où les cultures industrielles (blé, betterave sucrière, pommes de terre), points forts de l'économie régionale, prédominent. A l'échelle de la France, le Nord-Pas-de-Calais est la zone la plus touchée par les pertes en sols [13]. En effet, le terroir limoneux de la région, qui lui confère son potentiel agricole, est très sensible à l'érosion, en raison de la battance des sols, en particulier s'ils ne sont pas protégés par un couvert végétal suffisant lors des périodes de fortes pluies. En outre ce phénomène devient de plus en plus intense avec l'appauvrissement de la diversité des assolements, le raccourcissement des rotations, la raréfaction de la jachère et la disparition des bocages [6]. Cela conduit à une multiplication des observations de phénomènes d'érosion dans la région, avec des conséquences parfois catastrophiques à l'image des coulées boueuses qui touchent les villages situés à l'aval de bassins versants agricoles [14] [15].

Ces enjeux environnementaux et économiques doublés des enjeux agricoles font que les problématiques d'érosion deviennent de plus en plus centrales pour les autorités en charge de la gestion des sols et des eaux superficielles [16], aussi bien en France qu'au Maroc.

Au Maroc, le Haut-commissariat des eaux et forêts et la lutte contre la désertification déploie beaucoup d'efforts dans le but de lutter contre l'érosion hydrique. Ces efforts se font via le programme d'aménagement des bassins versants (Plan d'aménagement des bassins versants) et la politique de l'eau (Plan national de l'eau). Ces programmes prévoient la modélisation des pertes en terre au niveau de 14 bassins versants sur la base du modèle RUSLE.

Les objectifs fixés par la programmation incluent également :

- Le développement de trois bases de données spécifiques au Maroc :
 - Climatique, afin de caractériser la diversité climatique du pays, et donc la répartition des facteurs d'érosivité des pluies.
 - Travail du sol, regroupant toutes les pratiques antiérosives et les techniques de conservation des sols utilisées au Maroc.
 - Traduction, soit une base de données de conversion des unités anglaise (utilisées initialement dans le développement de RUSLE) vers le système international (SI) ainsi que la traduction des interfaces de l'anglais vers le français.

- La validation du modèle moyennant des mesures directes de l'érosion. Deux options ont été recommandées [17] pour la validation des estimations des pertes en terre par modélisation :
 - L'utilisation de moyennes annuelles ;
 - L'utilisation de données culturales pour différentes périodes de croissance (pépinière, semis, récolte, etc.)

Pour la région du Nord-Pas-de-Calais, la lutte contre l'érosion hydrique et le ruissellement a été initiée par des programmes d'intervention de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie :

- Le 7ème programme d'intervention (1997-2002) a permis l'émergence d'ouvrages de rétention dans les bassins versants et d'une réflexion sur l'approche agronomique dans la lutte contre le phénomène érosif.
- Le 8ème programme (2003-2006) marque une pause pour l'Agence de l'Eau Artois-Picardie qui s'est retirée du financement des actions de lutte contre l'érosion. Ce retrait était motivé par une difficulté bien réelle à cerner la problématique et les enjeux liés à l'érosion hydrique.
- Le 9ème programme (2006-2012) visait à diminuer les transferts de matières en suspension dans les masses d'eau.
- Le 10ème programme (2013-2018) s'est articulé autour de 4 actions complémentaires (i) une approche agronomique pour favoriser l'infiltration, (ii) l'installation d'ouvrages d'hydraulique douce répondant à des pluies de période de retour de 2 à 5 ans, (iii) la mise en place d'ouvrages de régulation (fossés, noues) et (iv) la mise en place d'ouvrages structurants (bassins de rétentions, digues de plein champ).
- Le 11ème programme (2019-2023) devra progressivement réintroduire une approche agronomique pour limiter les phénomènes érosifs.

Organisation du document de la thèse

Le présent rapport s'articule autour de trois parties :

La **Partie 1** est une synthèse documentaire qui brosse un tableau général sur les sols et l'érosion hydrique (Chapitre 1) d'une part, et sur les méthodes d'évaluation de ce processus (Chapitre 2) d'autre part.

La **Partie 2** décrit précisément le périmètre d'étude de la thèse, tant du point de vue géographique que méthodologique. Ainsi, elle concerne en premier lieu la présentation des deux zones d'études, soit le bassin versant de l'oued El Abid dans le Haut Atlas central marocain (Chapitre 1) et l'ancienne région française Nord-Pas-de-Calais (Chapitre 2). Ces descriptions incluent des analyses des contextes climatiques, morphologiques, hydrologiques, géologiques, pédologiques ainsi que de l'occupation des sols de chaque zone d'étude. La Partie 2 expose également la méthodologie retenue et les données qui la nourrissent (Chapitre 3).

La **Partie 3** reporte les résultats de modélisation pour chaque cas d'étude, l'oued El-Abid (Chapitre 1) et le Nord-Pas-de-Calais (Chapitre 2). Pour la région française, la disponibilité des données permet de décliner la modélisation RUSLE par saisons intra-annuelles, d'analyser les pertes par types de culture et d'explorer le potentiel du couvert d'intersaison. Finalement, les résultats des deux zones d'étude sont comparés afin de conclure sur les facteurs accélérateurs de l'érosion hydrique et de proposer les pratiques antiérosives adaptées à chaque contexte (Chapitre 3).

Partie 1 :
Synthèse bibliographique

Chapitre 1 : Les sols et l'érosion hydrique

1. La formation d'un sol

Le sol est le produit de l'altération de la roche mère sous-jacente, avec un apport de matières organiques. La pédologie décrit les différents types de sols ainsi formés, en distinguant la couche arable, riche en matières organiques, et l'horizon sous-jacent entre la couche arable et la roche mère. Cet horizon contribue à la nutrition de la plante en éléments minéraux et en eau. L'agronomie s'intéresse à ces deux horizons à travers le profil cultural [18] (Figure 1).

La particularité d'un sol est la présence simultanée de matières organiques et minérales, contrairement à la roche mère dont il est issu. Il s'agit d'un milieu complexe qui doit être considéré dans tous ses aspects, physiques, chimiques et biologiques, et surtout dans sa composante dynamique.

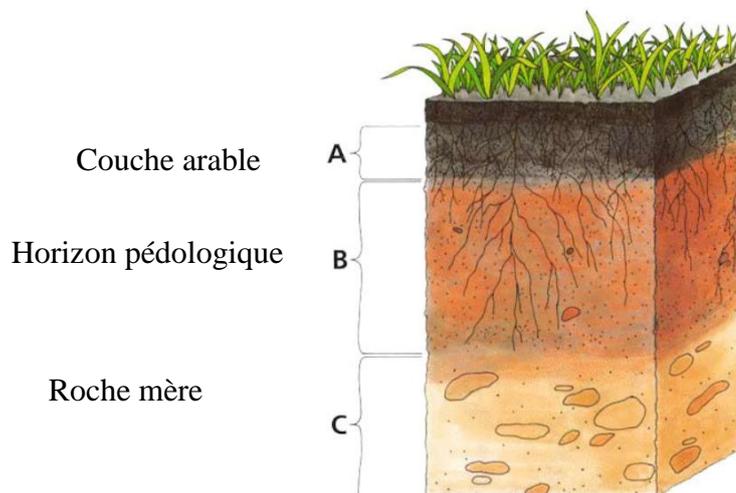


Figure 1 : Les horizons d'un sol
source : USDA (modifiée)

La vie d'un sol est composée de différents stades d'évolution temporelle : néoformation, jeunesse, maturité, sénilité. Cette évolution est assez lente et la durée de chaque phase varie d'un type de sol à l'autre, et selon les conditions climatiques auxquelles ils sont soumis. Des datations de la matière organique au carbone 14 permettent de déterminer l'âge moyen des horizons de surface de certains sols. Ces âges, très divers, se chiffrent souvent à plusieurs milliers d'années. Or, sur des périodes aussi longues, les conditions climatiques ont généralement varié et au gré de ces variations, certains processus de l'évolution des sols ont pu être accélérés ou freinés, voire même, dans les cas extrêmes, des processus de pédogenèse complètement différents de ceux œuvrant actuellement ont pu avoir lieu.

Dans le nord de la France, des phénomènes de remaniement périglaciaires (cryoturbation) ont détruit ou tout au moins modifié considérablement les différenciations pédologiques plus anciennes. Les sols actuels sont le plus souvent postglaciaires et moyennement évolués.

Dans les régions méditerranéennes, au contraire, les sols anciens se sont conservés. Ils n'ont pas été rabotés par les glaciers et, malgré l'érosion provoquée par l'action de l'Homme, ils montrent encore très nettement les traces des pédogenèses antéquaternaires (sols rouges).

2. L'érosion hydrique

L'érosion hydrique constitue un phénomène naturel affectant tous les types de sol, sous tous les climats et quels que soient la nature pédologique, les conditions topographiques et le couvert végétal. En revanche, son intensité et ses effets varient en fonction des conditions locales [19]. En particulier, des facteurs anthropiques (pratiques agricoles), se superposant aux conditions naturelles, peuvent constituer des facteurs aggravant de l'érosion. Ces interactions s'expriment de façon complexe, soit simultanément, soit successivement, au cours d'une série de processus (de détachement, de transport et de dépôt), principalement sous l'action des gouttes de pluie et via le phénomène de ruissellement (Figure 2).

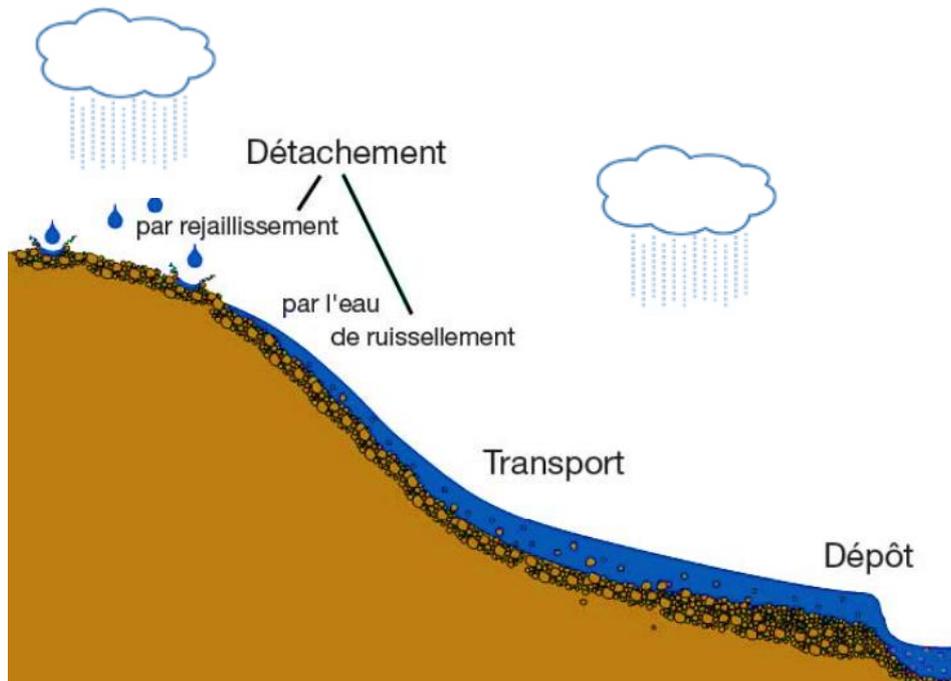


Figure 2 : Processus de l'érosion hydrique
source : Dautrebande et al. (2006) [20] (modifiée)

2.1. Les processus de l'érosion hydrique

2.1.1 Détachement des particules du sol

La pluie est reconnue depuis longtemps comme l'agent essentiel de l'érosion des sols [21] [22]. Le détachement des fines particules de la surface du sol peut être initié de deux manières [23] [24] [25] [26] [27] : soit sous l'action des gouttes de pluie, soit secondairement par ruissellement.

L'énergie cinétique des gouttes de pluie lors de l'impact avec le sol a pour effet de désagréger les éléments présents à la surface, formant ainsi des agrégats de plus petite taille voire des particules élémentaires. Ces produits de désagrégation sont ensuite détachés et éjectés radialement autour du point d'impact, avant de se redéposer à la surface. Ce rejaillissement d'eau et de sol est communément désigné par le terme "splash" (Photo 1) [26]. La distance moyenne de projection des particules est comprise entre 10 et 20 cm [28], c'est-à-dire beaucoup plus que ce que l'observation visuelle du phénomène ne le laisse supposer. Ces éléments détachés subissent ainsi un tri granulométrique entraînant la formation d'une croûte superficielle de quelques millimètres appelée "croûte de battance" (Photo 1). Constituée des éléments les plus fins (fraction argilo-limoneuse), celle-ci entraîne une diminution notable de l'infiltration de l'eau dans le sol (Figure 3).



Photo 1 : Effet splash (à gauche) et croûte de battance (à droite)

Le sol n'étant plus en mesure d'absorber les pluies, l'excès d'eau s'accumule en surface (formation de flaques) puis ruisselle en transportant éventuellement des particules de sol et des nutriments.

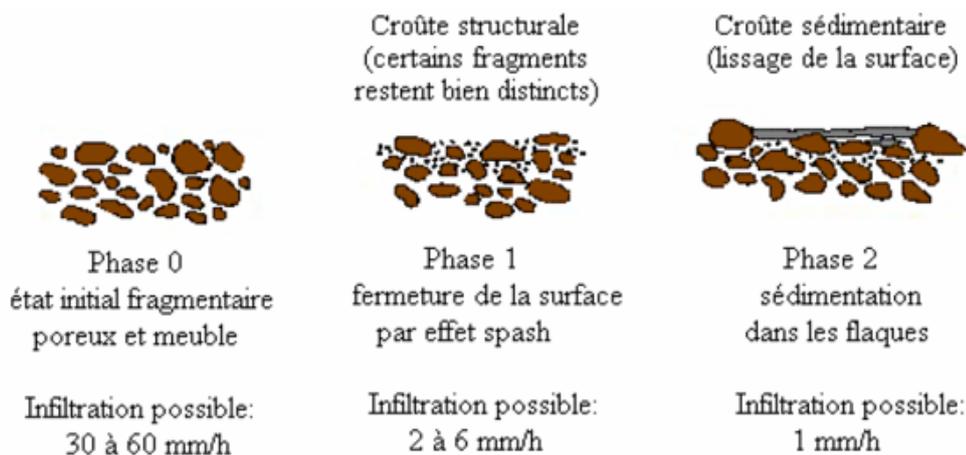


Figure 3 : Les stades de formation d'une croûte de battance

source : Boiffin (1984) [23]

La deuxième forme de détachement est liée à la force tractrice des écoulements. En fonction de l'énergie du ruissellement, des incisions linéaires apparaissent, plus ou moins espacées, que l'on appelle griffes, rigoles ou ravines, selon leur dimension. Celles-ci sont inhérentes aux irrégularités de la topographie et/ou induites par les activités agricoles. L'importance du flux de détachement est contrôlée à la fois par les caractéristiques des écoulements (vitesse, débit de pointe), par la résistance du sol à l'arrachement et par la teneur en matières en suspension de l'eau de ruissellement.

2.1.2 Transport des particules du sol

Le ruissellement, d'un point de vue hydrologique, désigne le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols durant ou à la suite d'une pluie. Il est considéré comme le vecteur principal du transport des particules du sol mises en mouvement sur une surface [26].

Deux processus majeurs pour expliquer l'apparition du ruissellement sont à distinguer : d'une part le refus d'infiltration d'un sol non saturé (dit ruissellement hortonien), et le refus d'infiltration d'un sol saturé d'autre part (mécanisme de Dunne). Toutefois, les deux mécanismes ne sont pas exclusifs, ils peuvent se succéder sur un même site voire lors d'un même événement pluvieux [29].

Ruissellement hortonien (mécanisme de Horton)

Le ruissellement hortonien est un ruissellement par refus d'infiltration sur sol non saturé. Il apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol [30]. Les études sur le ruissellement hortonien montrent que, schématiquement, la capacité d'infiltration d'un sol décroît au cours d'un événement pluvieux jusqu'à atteindre un seuil qui est la capacité d'infiltration à saturation. Tant que l'intensité de la pluie est inférieure à la capacité d'infiltration, toute la pluie s'infiltré, mais dès que l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité

d'infiltration, l'eau de pluie qui s'infiltré est limitée à la capacité d'infiltration du sol. L'excédent d'eau qui ne s'est pas infiltrée constitue le ruissellement.

La formation d'une croûte de battance à la surface du sol est un phénomène très favorable à l'apparition du ruissellement hortonien. En effet, la croûte sédimentaire diminue à la fois la rugosité de surface (forces de frottement moindres) et crée une barrière imperméable qui empêche l'eau de s'infiltrer dans un sol dont les horizons sous-jacents sont non-saturé par ailleurs. Ce phénomène provoque d'importants épisodes de ruissellement et d'érosion [1]. Les sols dont la structure n'est pas stable (faible taux d'argile ou de matière organique), et pour lesquels le couvert végétal est peu développé, sont particulièrement sujets à ce phénomène.

Le ruissellement hortonien dépend donc des caractéristiques de la pluie (intensité) et des propriétés hydrauliques de la couche superficielle du sol. Il se produit sur des sols peu perméables ou initialement secs.

Ruissellement sur sol saturé (mécanisme de Dunne)

Le ruissellement sur sol saturé se produit quand l'eau de pluie ne peut plus s'infiltrer dans le sol car celui-ci est saturé de la profondeur jusqu'en surface : la capacité du sol à stocker l'eau est épuisée, tous les pores sont pleins d'eau et la capacité à transmettre le flux d'eau est trop faible, l'eau s'écoule alors en surface. Ce ruissellement apparaît lorsqu'une nappe est présente à proximité de la surface du sol. L'eau infiltrée en début d'événement pluvieux va entraîner un affleurement de la nappe assez rapidement, présentant ainsi une surface saturée pour la pluie tombant par la suite. Le ruissellement sur sol saturé est fréquemment observé dans les zones proches du réseau hydrographique ou pour des zones affectées par des nappes perchées temporaires ou permanentes liées à la présence d'un horizon de sol peu perméable à faible profondeur.

Ce ruissellement peut se produire pour des faibles intensités pluvieuses puisqu'il dépend de l'état initial du sol, de la position de la nappe et des caractéristiques des écoulements souterrains (capacité de drainage de la nappe superficielle, profondeur de l'horizon imperméable...).

Une fois le ruissellement déclenché, l'érosion hydrique peut se manifester [31].

Autres variables de contrôle du ruissellement

Outre les caractéristiques des pluies et des sols, d'autres facteurs influencent l'apparition et l'intensité de l'érosion. En particulier, la présence de végétation tend à ralentir la vitesse de ruissellement [32] [33] [34] [35].

Les autres principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement [36].

L'écoulement de l'eau sur le sol exerce une action cisailante sur les grains de surface qui est d'autant plus forte que la vitesse du courant est importante. Le sol quant à lui, via sa rugosité, offre une résistance au détachement de ses grains superficiels qui peut être assimilée à une sorte de résistance au cisaillement.

Transport solide

Que ce soit dans des phénomènes de ruissellement de surface ou bien dans les écoulements chenalés (lit d'oued, rivières pérennes), dès que les particules de sol sont entraînées, le terme de transport solide apparaît. Même si les échelles d'écoulement diffèrent, deux grands modes de transport des particules peuvent être distingués (Figure 4) pour chaque cas : le transport de fond et le transport en suspension [37]. Pour une taille de grain donnée, le mode de transport est fixé par les conditions hydrauliques : lorsque la force de cisaillement à la base de l'écoulement d'eau dépasse le seuil critique de cisaillement, les particules commencent à se déplacer sur la surface du sol ou sur le fond de la rivière par roulement, glissement ou petits bonds. Lorsque les conditions hydrauliques deviennent turbulentes et que les fluctuations de vitesse verticale sont importantes, les particules peuvent être maintenues en suspension et passer peu de temps en contact avec le fond [37] [38]. Les particules se trouvent emportées par l'eau tant que la vitesse d'écoulement reste supérieure à la vitesse limite de maintien en suspension (dépendant de leur granulométrie). Dans le cas contraire, on observe une décantation et une sédimentation des matériaux. De manière générale, les matières en suspension sont des particules de petites tailles : argiles, limons et sables, qui physiquement peuvent être transportées sur de longues distances.

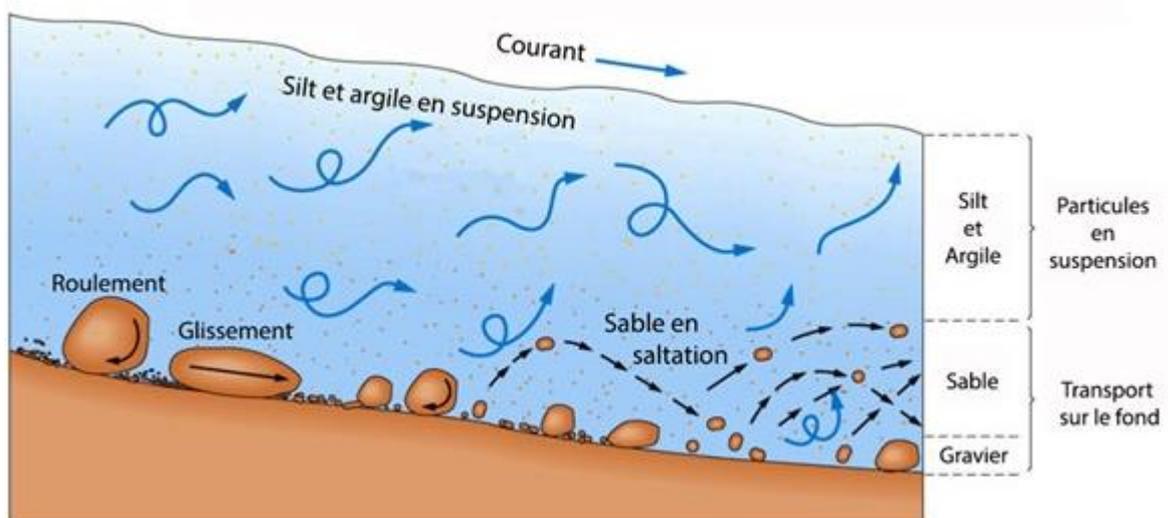


Figure 4 : Mode de transport des particules dans les cours d'eau

2.1.3 Dépôt des particules du sol

Le dépôt des particules et leur sédimentation se produisent lorsque la force du ruissellement n'est plus suffisante pour les maintenir en suspension [39]. Il résulte d'un ralentissement de la vitesse d'écoulement dont les causes peuvent être multiples. Ainsi, le diagramme de Hjulström [40] permet de relier la vitesse occasionnant une sédimentation avec le diamètre des particules (Figure 5, [40]). La texture des sédiments et la géométrie des dépôts qui en résultent sont d'importants indices sur l'agent de transport, sa vitesse au moment du dépôt, sa direction, etc. Les éléments les plus grossiers auront tendance à se déposer en zone de replat, les éléments les plus fins arrivent le plus souvent jusqu'aux cours d'eau.

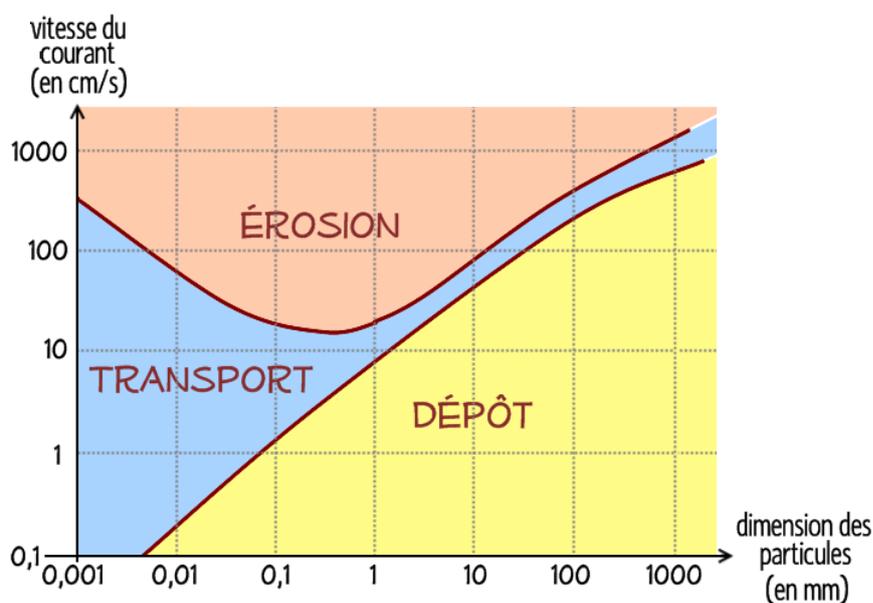


Figure 5 : Diagramme de Hjulström

2.2. Les facteurs de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est le résultat de l'interaction combinée des facteurs naturels et anthropiques qui semblent communs à toutes les latitudes, même si leur importance relative varie selon le contexte géographique et climatique. Les facteurs naturels regroupent le couvert végétal, la pluie, la topographie et les propriétés des sols quand les facteurs anthropiques sont principalement liés aux pratiques agricoles [41] [42] [43] [44].

2.2.1 Le couvert végétal

Le couvert végétal est le facteur le plus important pour la conservation des sols. L'érosion hydrique augmente lorsque le sol n'a pas ou peu de couvert végétal. En effet, ce dernier protège la surface du sol des gouttes de pluie, et donc du détachement par splash. La végétation ralentit également la vitesse du ruissellement en augmentant la rugosité de surface, réduisant

ainsi le détachement et le transport des particules du sol. De plus, le couvert végétal favorise l'infiltration des eaux de pluie et assure l'enrichissement en matière organique et donc la structuration des sols. Roose et al. (1993) [45] ont prouvé qu'un couvert végétal dépassant 40 % de la surface réduit fortement les pertes en terre, même pour des sols en fortes pentes. Pour protéger le sol, la couverture végétale figure dans la majorité des programmes de conservation des sols.

2.2.2 La pluie

La pluie est l'agent essentiel de l'érosion des sols. Les gouttes de pluies détachent et érodent les particules de sols. L'influence de la pluie sur les processus d'érosion dépend du diamètre des gouttes, de leur distribution, de leur énergie cinétique de chute et de leur masse totale. Ces caractéristiques déterminent la capacité d'érosivité vis-à-vis des particules du sol [46] [47] [48]. L'érosion hydrique s'exprime principalement lorsque les eaux de pluie ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol. Ce refus du sol apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol, soit lorsque la pluie arrive sur une surface de sol déjà saturée.

2.2.3 La topographie

La topographie est un facteur amplificateur de l'érosion hydrique dans certains cas. Des mesures réalisées sous pluies naturelles et simulées à l'échelle du mètre carré ont démontré que l'érosion par la pluie augmente significativement lorsque la pente passe de 2 à 8% [49]. Par ailleurs, la forme de la pente joue un rôle primordial dans le processus de l'érosion hydrique ; une pente convexe indique une accélération relative de l'écoulement et donc des risques d'érosion alors qu'une pente concave indique une zone de décélération relative de l'écoulement, lieu dominé par les processus d'accumulation [50] [51].

Dans les pays du pourtour méditerranéen, la tectonique a créé un paysage à la topographie accidentée [52] [53]. Cette variation topographique engendre des écosystèmes vulnérables aux processus de dégradation des sols [54] [55].

2.2.4 Les propriétés des sols

La résistance des sols à l'érosion hydrique dépend de leurs propriétés physiques, à savoir la structure, la texture, la teneur en matière organique et la perméabilité [43] [42] [44]. Les horizons de surface ayant une texture fine et/ou relativement pauvre en matière organique sont sensibles à l'érosion hydrique [56]. En effet, la matière organique est un liant pour les particules minérales, assurant ainsi l'agrégation et la structuration des sols [57].

Les sols de la région méditerranéenne sont souvent peu profonds, leur résistance à l'érosion est donc faible. Ils sont aussi fragilisés par leur une faible teneur en matière organique, étant

principalement composés d'argiles et de marnes [58]. En contrepartie, la présence courante des fragments rocheux dans l'horizon superficiel de ces sols crée des obstacles à l'écoulement, diminuant ainsi la vitesse du ruissellement et par conséquent, l'érosion [59].

2.2.5 Les activités anthropiques

L'érosion hydrique est influencée par les activités humaines qui, pour certaines, accélèrent le processus de dégradation des sols en les déstructurant ou en limitant le couvert végétal. Pour exemple, citons le surpâturage, la surexploitation du bois de chauffe et du bois d'œuvre, le déboisement illégal ou encore l'absence de culture d'intersaison laissant des sols agricoles nus. Au contraire, certaines pratiques génèrent des situations protectrices vis-à-vis de l'érosion hydrique (boisement, couvert hivernal des cultures, maintien des résidus de récolte).

Dans un contexte agricole sur des sols en pente, selon le type d'instruments aratoires utilisé, le nombre et la période des passages ainsi que les techniques de travail du sol (forme et orientation des sillons) le processus d'érosion peut être aggravé ou limité [60]. En outre, une partie des pertes en sols s'explique alors aussi par l'action même des machines agricoles (érosion aratoire) et par la fraction de terre fixée au produit des récoltes (tubercules).

Dans les régions méditerranéennes, l'intensité de l'érosion hydrique des sols est affectée significativement par les activités humaines [61] [42]. Notons que les incendies des forêts présentent un sérieux problème qui entraîne des dommages considérables dans ces régions [62].

2.3. Les formes d'érosion hydrique

L'érosion hydrique se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant des particules de terre. Une fois le ruissellement initié sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace. On distingue :

- L'érosion en nappe ;
- L'érosion linéaire ;
- L'érosion par glissement de terrain ;
- L'érosion aratoire ;
- L'érosion par sapement de berges.

2.3.1 L'érosion en nappe

L'érosion en nappe est le stade initial de dégradation, il se produit lorsque l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol. Cette énergie arrache les particules sous

l'effet splash, ensuite mobilisées et transportées par le ruissellement en nappe (Photo 2). C'est une forme d'érosion diffuse, elle est donc de fait peu visible d'une année à l'autre [63].



Photo 2 : Erosion en nappe

2.3.2 L'érosion linéaire

L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement s'organise selon un réseau linéaire ramifié, à l'image d'un réseau hydrographique miniature. Le ruissellement creuse alors des formes de plus en plus profondes suivant les lignes d'écoulement sur la surface du sol. Selon le degré et la profondeur du creusement on distingue :

L'érosion en griffes

Les griffes se forment lorsque les petits canaux d'écoulement ne font que quelques centimètres de profondeur.

L'érosion en rigoles

Les rigoles se forment lorsque les eaux de ruissellement se concentrent, forment des filets et occasionnent des canaux de plus de 10 cm de profondeur (Photo 3). Ces canaux peuvent être comblés chaque année par le travail du sol [64].



Photo 3 : Erosion en rigole

L'érosion par nappe ravinante

Les nappes ravinantes se forment lorsque la profondeur des canaux reste circonscrite entre 10 et 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres.

L'érosion par ravinement

Le ravinement est un stade avancé de l'érosion linéaire. Suite à plusieurs séquences pluviales, l'érosion en rigoles crée de profondes incisions, appelées ravines lorsqu'elles atteignent plusieurs dizaines de centimètres (plus de 50 cm) [63]. Elle est notamment caractérisée lorsque les ravines ne sont plus effaçables par les techniques culturales. Trois types de ravinement peuvent être considérés :

- les ravines en "V", qui se développent sur des matériaux homogènes comme les altérites d'argilite, de schiste et de marne (Photo 4) ;
- les ravines en "U", qui se développent sur des matériaux hétérogènes comme les couvertures pédologiques (formes juvéniles) sur croûtes calcaires ;
- les ravines en tunnel, qui se forment dans des matériaux riches en argiles gonflantes ou en sels solubles (cas des marnes gypseuses).



Photo 4 : Exemple d'érosion hydrique en ravines dans la zone d'étude

2.3.3 L'érosion par glissement de terrain

L'érosion par mouvement de masse ou érosion en masse se manifeste par le déplacement d'un volume de sols et roches. Elle résulte d'un déséquilibre entre, d'une part, la masse de couverture pédologique, la gravité, les forces de frottement interne, et d'autre part l'humectation du terrain et de la surface de glissement.

2.3.4 L'érosion aratoire

L'érosion aratoire, encore appelée l'érosion mécanique sèche, correspond à un mouvement en masse superficiel, lié aux transports de terre dus au travail du sol orienté vers le bas de la pente à la houe, ou au tracteur portant charrue et engins divers. Ce phénomène peut entraîner 2 à 10 tonnes de terre dans le sens du travail à chaque passage [65]. Ce type d'érosion additionnel est souvent sous-estimé et peut créer en sus des conditions favorables à l'érosion hydrique elle-même (déstructuration et tassement des sols) (Photo 5).



Photo 5 : Déplacement progressif du sol vers le bas de la pente par les machines agricoles

2.3.5 L'érosion par sapement de berges

Le sapement de berges est généralement présent dans la partie moyenne et aval des bassins versants (Photo 6). Elle est due à la dissipation de l'énergie de l'eau dans les lits des cours d'eau et des rivières. Les écoulements affouillent la base des berges des oueds, qui s'écroulent sous l'effet du poids des matériaux en surplomb. Il se produit également dans les ravins en formation lorsque l'eau du ruissellement attaque les assises du ravin. Il est étroitement lié au volume et à la vitesse de l'eau, qui dépend entre autres de la pente, de la rugosité et du débit [66].



Photo 6 : Erosion par sapement de berges

Chapitre 2 : Approches de quantification de l'érosion hydrique

1. Approches de quantification de l'érosion hydrique

L'objectif dans cette partie est de donner un aperçu général sur les différentes méthodes et techniques utilisées pour quantifier et cartographier les risques de l'érosion hydrique.

Généralement, la quantification et la mesure des sols érodés varient en fonction des objectifs, des moyens, des échelles d'espace et de temps considérées. Néanmoins on peut distinguer deux grands types de mesures : les mesures directes, s'effectuant sur le terrain, et les mesures indirectes reposant sur la combinaison d'indicateurs de dégradation des sols.

1.1. Mesures directes

1.1.1 Mesures topographiques

Cette méthode est basée sur le suivi de l'évolution topographique de la surface du sol grâce à des repères stables placés sur le terrain. Ceux-ci peuvent prendre la forme de simples piquets, bien stabilisés, soit de fils tendus ou encore de règles placées horizontalement, selon la direction des isohypses, entre deux points d'appui fixes et stables, généralement distants d'un à deux mètres. Pour une mesure plus fine et distribuée de l'érosion, ces repères peuvent être répétés tout le long d'un versant.

Le déchaussement ou le recouvrement des piquets, la variation de la surface comprise entre un fil ou une règle et sa projection verticale sur le terrain, après chaque événement pluvieux, servent à estimer les pertes en sols.

1.1.2 Mesures sur parcelle expérimentale

Cette méthode consiste à délimiter une parcelle ou un champ de quelques centaines de mètres carrés, dont le fonctionnement est assimilé à celui d'un véritable bassin hydrologique. Par sa taille et ses limites bien circonscrites, une parcelle expérimentale permet une bonne identification à la fois des facteurs (pente, pédologie, végétation, précipitation) et de l'état de dégradation du sol [5].

Ainsi, cette technique est à la fois utilisée pour caractériser les processus hydrodynamiques de l'érosion (détachement, ruissellement sous l'influence de différentes pluies) et la quantification des pertes en sol qui en résultent. La mesure de ces dernières fait généralement appel à un système d'exutoire artificiel, où les pertes en sol sont drainées par un réseau de conduits et collectées dans des bacs (Figure 6).

La méthode des mesures à l'échelle parcellaire permet donc l'identification des facteurs intervenant sur l'ensemble du processus érosif, mais aussi de former des lois empiriques reliant les pertes en terre aux caractéristiques du milieu [67].

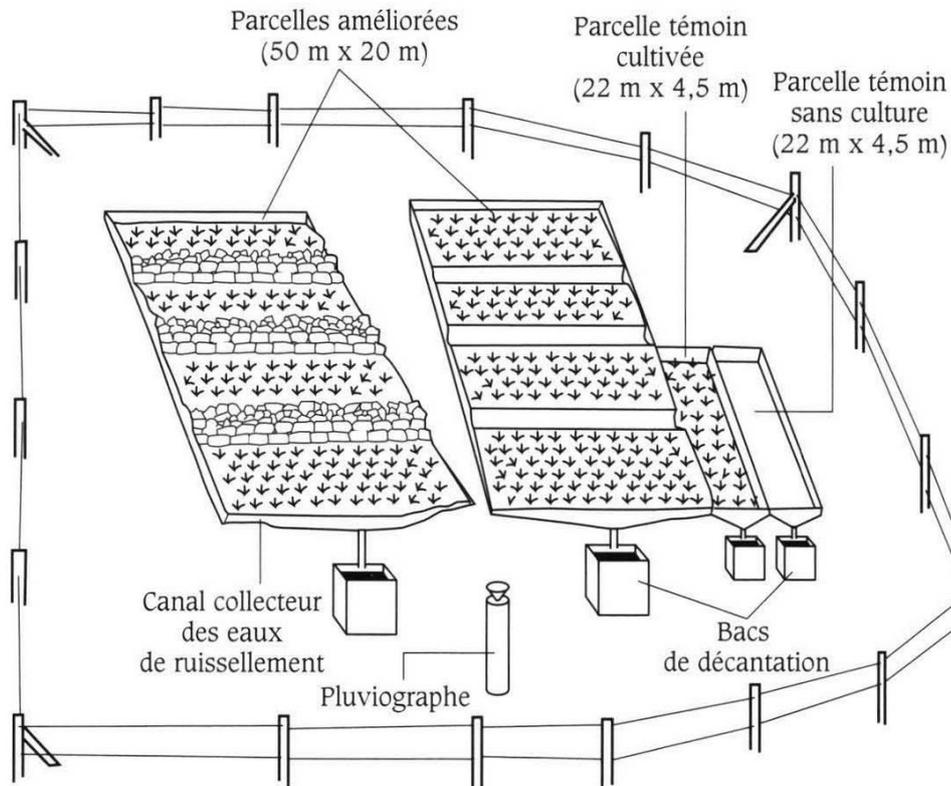


Figure 6 : Dispositif expérimental
source :De Noni et al. (2001) [68]

1.1.3 Mesures par l'étude des sédiments

L'estimation de la quantité des sédiments déposés dans une retenue dépend de deux paramètres principaux. En premier lieu, la densité des sédiments, qui varie elle-même en fonction de nombreux facteurs : l'épaisseur et l'âge du dépôt, la granulométrie, la composition minéralogique et le niveau de l'eau dans la retenue notamment [5] [69]. Tous ces éléments déterminent l'évolution du tassement et, par conséquent, l'évolution de la densité des sédiments en fonction du temps.

Le deuxième paramètre est le volume des sédiments déposés qui est déterminé par la bathymétrie, et qui peut être calculé par différence entre le niveau de la cuvette envasée à un temps donné et celui du fond avant la mise en eau du barrage, ou lors de la mesure précédente [70].

1.2. Mesures indirectes

1.2.1 Télédétection et imagerie satellitaire

Après le début des lancements de satellites lors de la seconde moitié du XX^e siècle, l'imagerie satellitaire est vite devenue une source de données privilégiée par les scientifiques, notamment pour l'évaluation de l'érosion des sols. Reposant sur des données et des imageries obtenues à la fois à grande échelle et à grande résolution (en particulier ces dernières années), les méthodes fondées sur la télédétection jouissent toujours d'une grande popularité pour étudier les pertes en sol [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80] [81] [82], [83].

Les données de télédétection permettent, dans ces travaux, d'évaluer et calculer les facteurs nécessaires à différents modèles, notamment les équations ULSE / RUSLE, nécessitant la caractérisation de la pente, de l'occupation de sol et des pratiques de conservation.

La télédétection ainsi que l'imagerie satellitaire ont également permis de caractériser l'état de surface des sols, via l'approche des indices spectraux, parmi lesquels on peut citer l'indice de forme (IF), l'indice de coloration (IC) ou encore l'indice de brillance (IB) [84] [85] [86] [87]. En outre, les techniques de classification basées sur la similarité spectrale sont largement utilisées pour la caractérisation de l'état de surface. Ces techniques ont été mise en œuvre dans plusieurs études cartographiques de dégradation des sols [88] [89] [90].

Si son potentiel spatial et temporel en fait une méthode d'évaluation rapide et à faible coût [91], les approches basées sur l'analyse et l'interprétation de l'imagerie satellitaire ne peuvent parfois pas se substituer aux mesures de terrain pour établir une compréhension du phénomène, en particulier à des échelles très locales ou quand le contexte pédoclimatique de la zone étudiée n'a pas encore fait l'objet d'un calage dans les modèles existants.

1.2.2 Traçage radioactifs

La technique des marqueurs isotopiques (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^7Be) constitue un moyen efficace pour tracer la dynamique des particules érodées et de les quantifier au sein des bassins versants. Cette technique repose généralement sur le suivi d'un radioélément, en particulier le césium 137 qui est présent dans l'environnement et apporté à la surface terrestre par déposition atmosphérique de radionucléides artificiels, liés aux essais d'armes nucléaires entre 1945 et 1980 et à l'accident de Tchernobyl en 1986 [92]. Une fois incorporé dans le sol, le césium 137 est fixé aux particules fines et permet donc de suivre leur devenir [93] [94] [95]. En mesurant la quantité de ^{137}Cs dans le sol, la redistribution des sédiments peut être déterminée et les taux d'érosion peuvent être calculés [96].

1.2.3 Modélisation

Plusieurs modèles d'érosion ont été développés pour l'évaluation des risques ou l'établissement de schémas d'aménagement visant à la conservation des sols, particulièrement dans le secteur agricole. Ces modèles peuvent être classés en trois catégories [97].

Les modèles empiriques

Les modèles empiriques consistent à établir une loi mathématique qui relie la variable de sortie à des variables d'entrée, dont la forme et les coefficients sont fixés à l'aide d'observation et de mesures sur le terrain. Ceci est effectué de façon expérimentale en ajustant les valeurs calculées par le modèle à celles mesurées sur le terrain. Ces modèles ont été créés pour jouer un rôle opérationnel. C'est-à-dire comme outil de conservation des sols. Pour la modélisation de l'érosion hydrique, les modèles ont été établis soit sur la base d'essais avec simulateur de pluie (in situ ou en laboratoire), soit sur la base de mesures de l'apport sédimentaire des cours d'eau ou des levées bathymétriques dans des lacs (naturels ou artificiels). Ils ne peuvent toutefois être appliqués que dans les conditions pour lesquelles les paramètres ont été calés. Les premiers modèles empiriques se basent sur l'équation universelle de Wischmeier (USLE). Cette équation prédit les pertes moyennes de sol qui sont occasionnées par l'érosion de surface [41].

Les modèles physiques

Les modèles à base physique utilisent des relations mathématiques qui miment les processus physiques à l'œuvre dans l'érosion hydrique. Couplant équations d'écoulement de surface, de saturation du sol et de transport solide, ces modèles synthétisent un grand nombre de paramètres, leurs interactions et leurs variations spatiales et temporelles [91] mais au prix d'une résolution délicate (non-linéarité, discrétisation, convergence itérative).

Les modèles conceptuels

Les modèles conceptuels sont en quelque sorte un mélange entre les modèles empiriques et les modèles physiques. Ils représentent les processus d'érosion de manière simplifiée, remplaçant les équations à base physique par des proxys (par exemple des réservoirs en série avec des lois de vidange pour mimer l'écoulement du flux vers l'exutoire). Ils sont souvent basés sur des équations de continuité des écoulements et du transport sédimentaire en fonction de la topographie.

2. Approches quantitatives retenues dans l'étude

2.1. Modèle USLE

L'équation universelle de pertes en sol [41], ou Universal Soil Loss Equation (USLE), a été utilisée dans plusieurs pays et appliquée largement à toutes les échelles pour prédire les pertes en sol. La popularité et le choix de ce modèle, outre ses résultats satisfaisants, repose sur le fait qu'il nécessite assez peu de données d'entrées par rapport aux autres modèles d'érosion des sols. En effet, son calcul repose sur la combinaison linéaire de 5 facteurs : l'agressivité des pluies (facteur R), la pente (facteur LS, combinant sa raideur et sa longueur), la pédologie (facteur K représentant la sensibilité du sol à l'action érosive des pluies), l'occupation de sol (facteur C) et, éventuellement, des pratiques de conservation de sol (facteur P).

Cependant, le modèle USLE présente certaines limitations puisqu'il ne prend en compte que les processus d'érosion en nappe et en rigole à l'échelle de la parcelle et ne permet pas d'aborder le phénomène à l'échelle d'un événement pluvieux (averse).

Pour l'amélioration du modèle USLE, des révisions et modifications sous plusieurs versions ont été faites, en lui incorporant des facteurs de ruissellement, afin notamment de l'adapter à l'étude d'un événement pluvieux unitaire [98].

Ainsi, le modèle USLE a été consécutivement dérivé en :

- MUSLE "Modified Universal Soil Loss Equation" [99]. Elle permet quant à elle de prévoir la production en sédiments à l'échelle de l'événement hydrologique en intégrant tous les facteurs d'érosion. Le changement apporté dans cette équation consiste à remplacer le facteur R par le volume ruisselé V_r (m^3) et le débit de pointe Q_p (m^3/s) d'une averse donnée.
- DUSLE "Differential Universal Soil Loss Equation" [100]. Celle-ci prend en compte la complexité topographique par l'utilisation du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et des pratiques antiérosives.
- Enfin RUSLE "Revised Universal Soil Loss Equation" [101] qui prend en compte la variabilité du facteur d'érodibilité K dans le temps (gel / dégel des sols), ainsi que la pente réelle au lieu d'une pente uniforme.

2.2. Modèle RUSLE

Le modèle RUSLE [101] s'intéresse à la quantification des pertes en sol par érosion en nappe et en rigole. C'est un modèle empirique conceptuel, il ne mime pas les processus d'érosion comme le détachement, le transport et le dépôt, pour estimer les pertes en sol mais repose sur des facteurs de sensibilité et de protection vis-à-vis de l'érosion.

En effet, RUSLE correspond à une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives. L'équation peut être exprimée comme suit :

$$A = R \times K \times C \times LS \times P \quad \text{équation 1}$$

A : Perte en terre ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$)

R : Agressivité climatique ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot an^{-1}$)

K : Erodibilité des sols ($t \cdot hr \cdot Mj^{-1} \cdot mm^{-1}$)

LS : Facteur topographique (relief)

C : Couvert végétal (occupation du sol)

P : Pratiques d'aménagement

2.3. RUSLE et son adaptation aux cas d'érosion au Maroc

Le modèle RUSLE a bénéficié des poussées technologiques des 50 dernières années, en particulier le développement de l'informatique et de l'imagerie satellitaire. Ce modèle est devenu opérationnel dans les travaux de planification de la conservation des sols aux Etats-Unis d'Amérique ainsi que dans plusieurs autres pays. Il a montré, dans certains cas, une meilleure efficacité par rapport à l'équation de base de Wischmeier.

Au Maroc, depuis 1989 et parallèlement à la politique d'étude et d'aménagement des bassins versants, le Ministère délégué auprès du Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes, chargé des Eaux et Forêts, a conclu, avec le PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement) et la FAO, le projet MOR/93/010 pour, entre autres, l'adaptation de RUSLE aux conditions du Maroc.

De ce fait, l'administration des Eaux et Forêts a lancé un programme ambitieux de modélisation des pertes en terre au niveau de 14 bassins versants à aménager, sur la base du modèle RUSLE. Ce choix a été motivé aussi par le fait que ce modèle ne diffère pas conceptuellement de l'équation originale de perte en sols [41]. Au contraire, il améliore la qualité des paramètres du milieu qui définissent le rôle de chaque facteur

Partie 2 :
**Présentation des zones
d'étude et méthodologie**

Chapitre 1 : Présentation du bassin versant de l'oued El Abid (Maroc)

1. Situation géographique

Le bassin versant de l'oued El Abid est situé dans le Haut Atlas central marocain à 54 km au sud de la ville de Béni Mellal, à 27 km au nord-est de la ville d'Azilal. Avec une superficie de 653 921 ha, la zone d'étude est définie dans le quadrillage Lambert suivant (Figure 7).

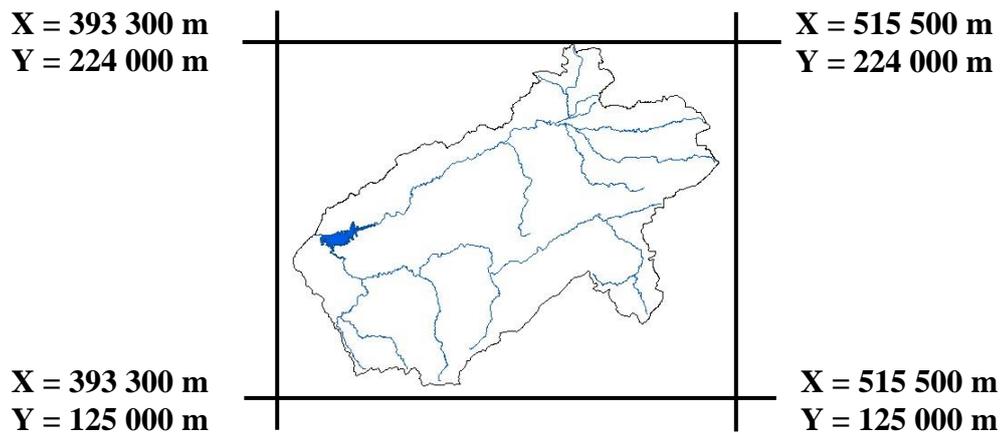


Figure 7 : Coordonnées de localisation du bassin versant de l'oued El Abid

Géographiquement, le bassin versant à l'amont du barrage Bin El Ouidane fait partie de la région de Béni Mellal-Khénifra. Il est limité au nord par les communes d'Aghbala et Tizi n'isly, au sud par la province de Tinghir et par les communes d'Ait M'hamed, Tabant et Agoudi n'lkhayr, à l'Est par la province de Midelt et à l'Ouest par les communes de Naour, Tanougha, Taghzirt, Foum El Anceur, Foum Oudi, Timoulilt, Ait Ouarda et Afourer (Figure 8).

Sur le plan administratif, le bassin versant de l'oued El Abid se situe sur deux cercles : Azilal et Ouaouizaght. Les agglomérations les plus importantes à son niveau sont : Ouaouizaght, Bin El Ouidane, Boutferda, Tagleft, Tillouguite, Tizi n'isly et Zaouiat Ahnçal.

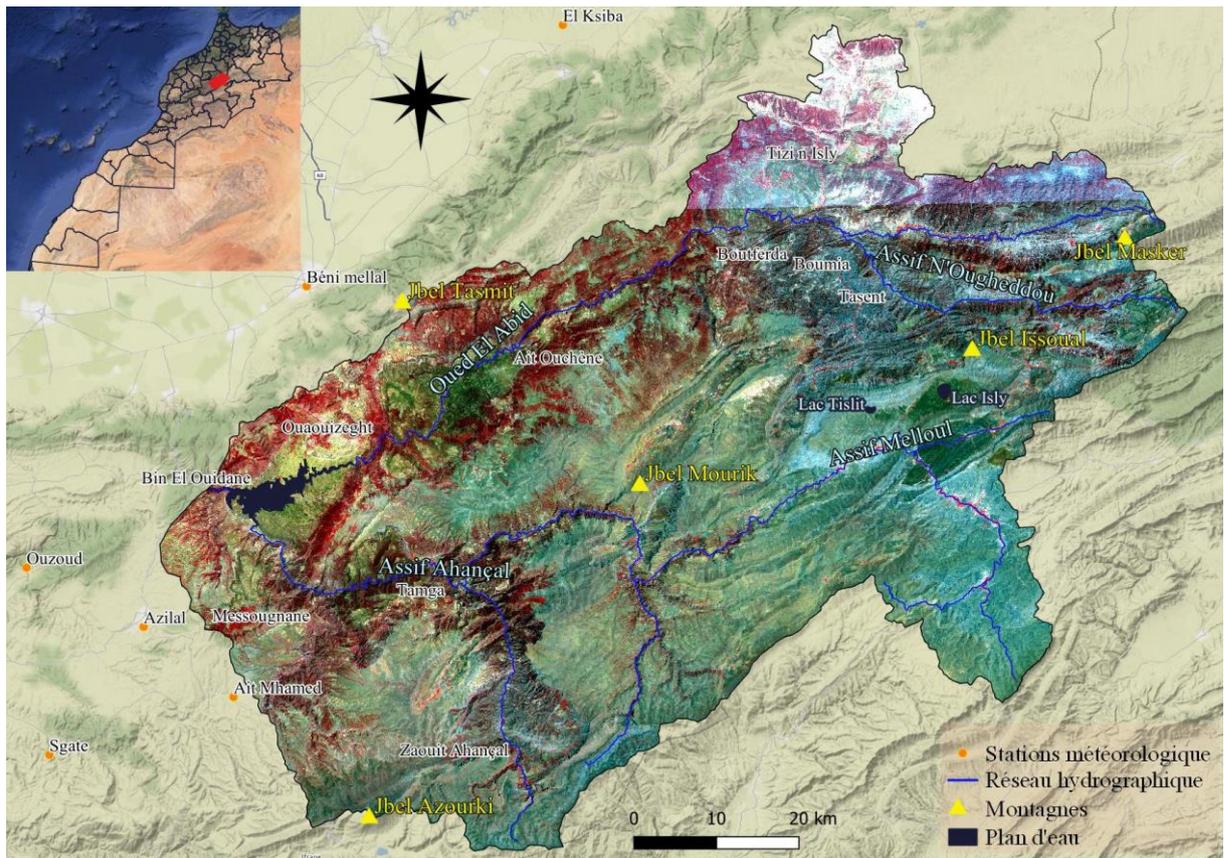


Figure 8 : Situation géographique du bassin versant de l'oued El Abid

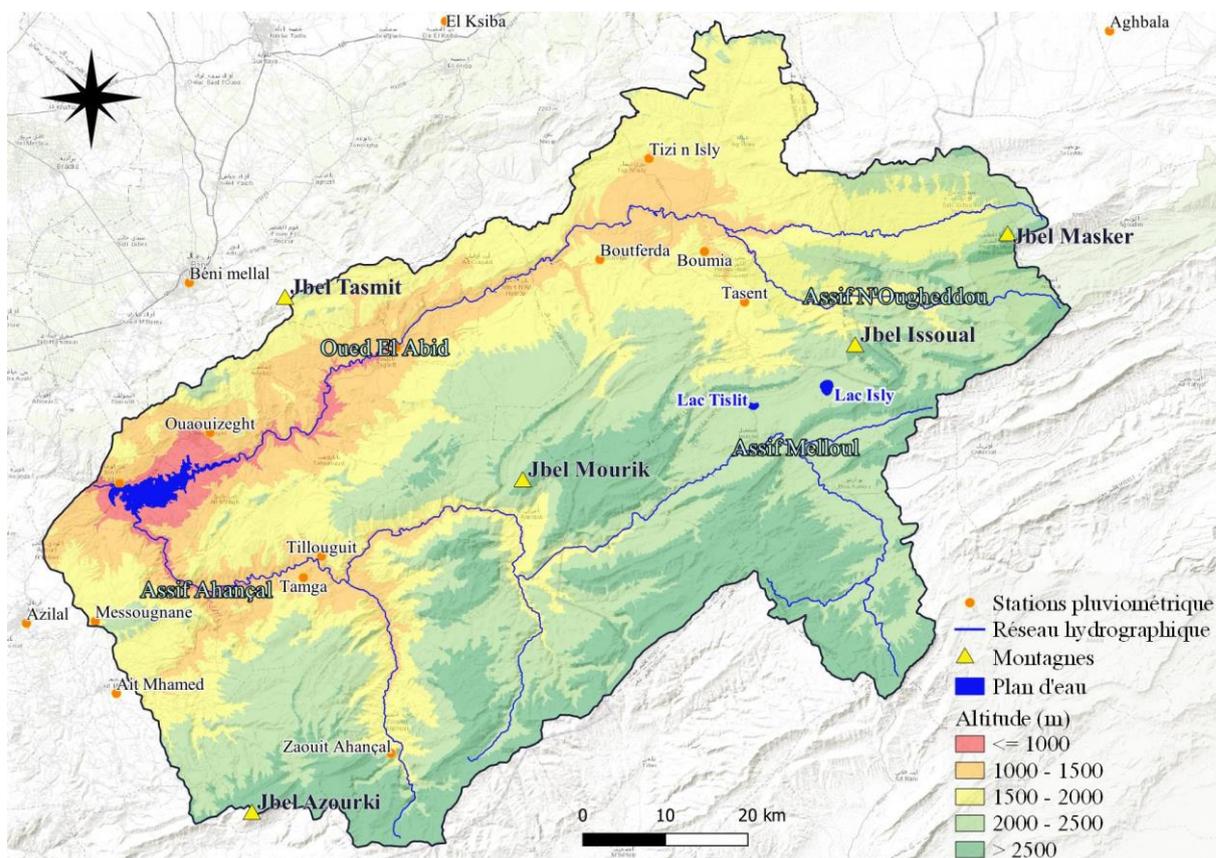
L'oued El Abid, qui prend sa source au niveau de Jbel Masker (3 277 m d'altitude), est le principal affluent de l'oued Oum-Er-Rbia. Il draine, avec son propre affluent Assif Ahnçal, un volume important des eaux provenant des versants amont de la zone d'étude. Ces zones montagneuses ont un potentiel important en ressource en eau qui recharge la nappe de la plaine de Tadla en aval. En effet le module journalier de l'oued El Abid au niveau de la station Ait Ouchène est de $6,58 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un apport de 207,5 millions de m^3 annuel pour une superficie de 2074 km^2 . Le module de l'oued Ahnçal à la station de Tillouguite est de $9,41 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 296,8 millions de m^3 annuel pour un bassin versant de 2296 km^2 . Le point de confluence entre ces deux cours d'eaux a donné place au barrage de Bin El Ouidane qui, avec une superficie de 3800 hectares, emmagasine un volume de 764 millions de mètres cubes. La construction du barrage en 1953 était à but multiple : alimentation en eau potable, irrigation du périmètre de Béni Moussa, production électrique, tourisme, sport et loisir.

2. Contexte climatique

2.1. Stations pluviométriques

L'étude du climat de la zone d'étude est effectuée à partir des données de précipitations et de température des stations climatiques du bassin versant de l'oued El Abid. Leur répartition est irrégulière à l'échelle de la zone d'étude. La totalité de ces stations sont installées le long des cours d'eau El Abid et Assif Ahançal sur des altitudes comprises entre 1000 m et 2000 m. Au-delà de 2000 m d'altitude aucune station n'est installée. Cette hétérogénéité spatiale est due principalement aux contraintes imposées par les reliefs et le manque d'infrastructures routières.

Pour caractériser le climat de la zone d'étude, onze stations sont retenues, dont quatre situées dans la périphérie du bassin versant de l'oued El Abid (Figure 9).



2.2. Précipitation

L'interpolation des données des 11 stations climatiques sur l'ensemble de la zone d'étude a été réalisée par la méthode déterministe (B-spline) (Figure 10).

Le résultat de spatialisation des pluies montre une hétérogénéité modérée, avec un écart entre pluviométrie maximale et minimale d'environ 100 mm/an. Les zones de basse altitude (inférieure à 1500 m) sont les plus humides et reçoivent une pluviométrie qui dépasse les 400 mm/an, tandis que les zones de hautes altitudes (supérieures à 1500 m) reçoivent une pluviométrie comprise entre 346 et 400 mm/an. Le gradient pluviométrique décroissant selon l'axe nord-ouest sud-est peut être exagéré du fait de l'absence de stations en haute altitude, engendrant un artefact d'extrapolation. Incidemment, ce résultat concorde avec le fait qu'au-delà de 2000 m d'altitude, les précipitations interviennent souvent sous forme nivale (entre 10 et 120 jours par an). A partir de 3500 m d'altitude, la neige peut même se maintenir deux mois et plus en année normale. Or, vis-à-vis de l'érosion, les chutes de neige ne présentent pas du tout les mêmes caractéristiques que la pluie (énergie cinétique quasi nulle), ainsi, cette incertitude sur la donnée ne produit pas d'incompatibilité conceptuelle.

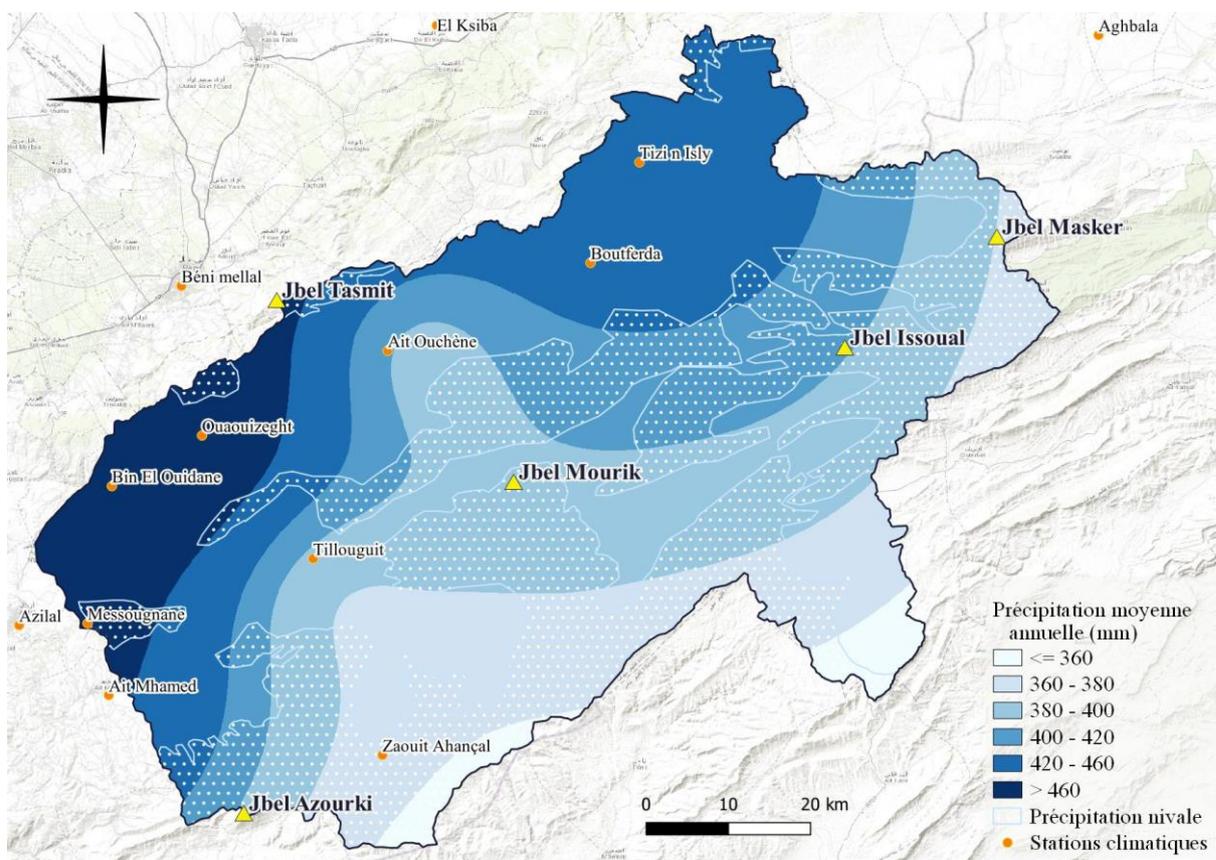


Figure 10 : Répartition spatiale des pluies moyennes annuelles

La variation mensuelle des précipitations dans la zone d’étude est présentée dans la Figure 11. Les pluies s’étalent de septembre à mai avec toutefois quelques orages convectifs aux mois de juin, juillet et août. Le maximum hivernal a lieu entre novembre et janvier et le maximum printanier en mars et avril. Ces caractéristiques sont typiques du climat méditerranéen semi-aride continental. La variabilité intra-annuelle des apports pluviométriques est assez importante. Cette variabilité se manifeste aussi par les débits des écoulements dans les rivières de la zone ; avec des étiages très marqués et durables durant la saison estivale.

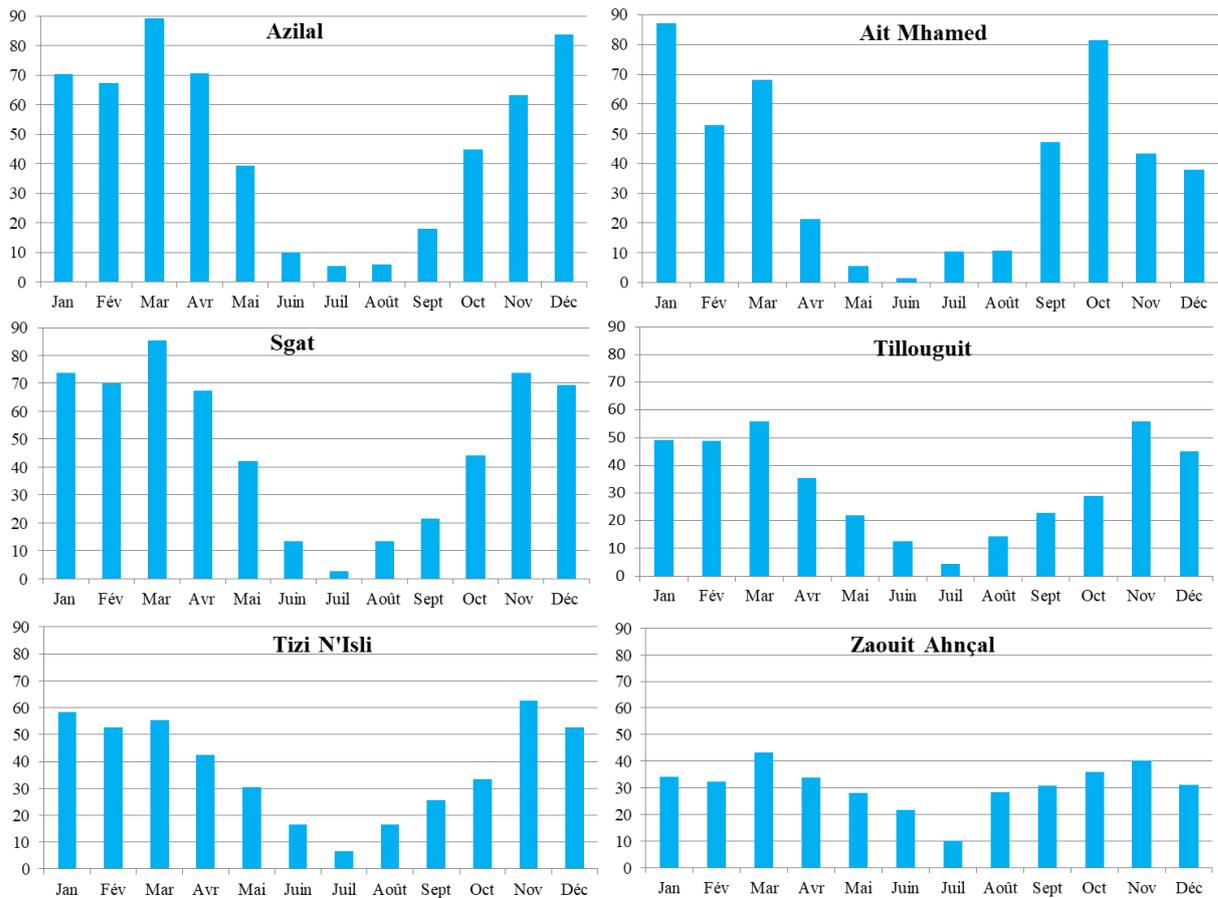


Figure 11 : Répartition mensuelle des pluies moyennes annuelles en mm (1991 -2018)

2.3. Température

Les températures dans l'ensemble du bassin versant de l'oued El Abid sont sujettes au gradient altitudinal ainsi qu'aux variations saisonnières. Les moyennes annuelles varient entre 12 et 19°C. Les températures en hiver sont très basses et peuvent atteindre - 9°C pendant les mois de décembre et janvier, tandis que les maximas d'été se situent aux alentours des 43°C pendant les mois de juillet et août.

Dans la partie sud du bassin versant au niveau des stations de Tillouguit et Zawit Ahnçal et jusqu'à 1500 m d'altitude, les températures moyennes annuelles se situent entre 15 et 18°C. En prenant de l'altitude et jusqu'à 1680 m, cette température décroît pour atteindre 12°C au niveau d'Ait-Mehamed. Dans les altitudes supérieures à 1600 m, le climat est marqué par des gels récurrents.

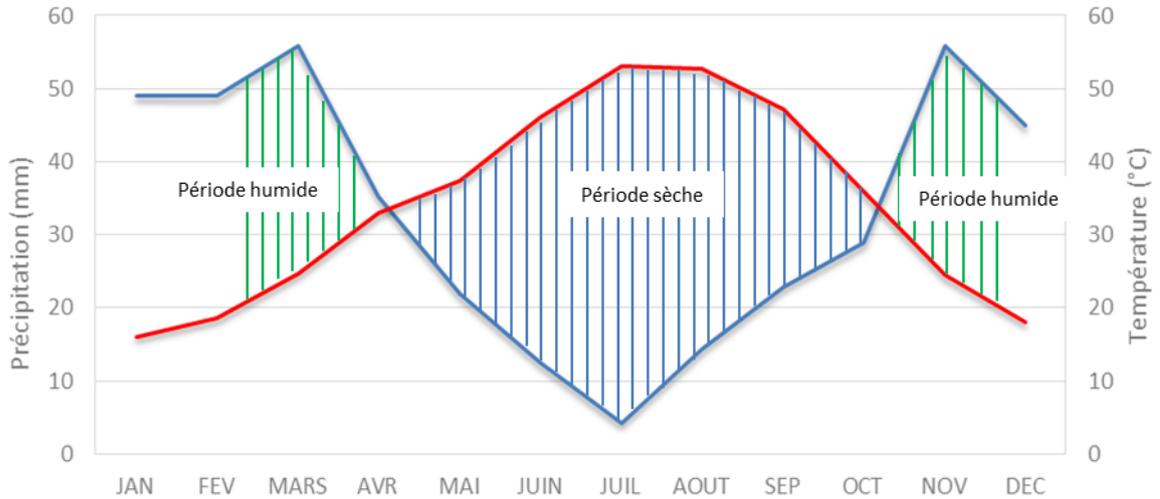
2.4. Synthèse bioclimatique

Les diagrammes de Bagnouls et Gaussen tracés pour les stations de Tillouguit et Sgat indiquent que la zone d'étude connaît en moyenne deux saisons durant l'année, une sèche et une autre humide (Figure 12) :

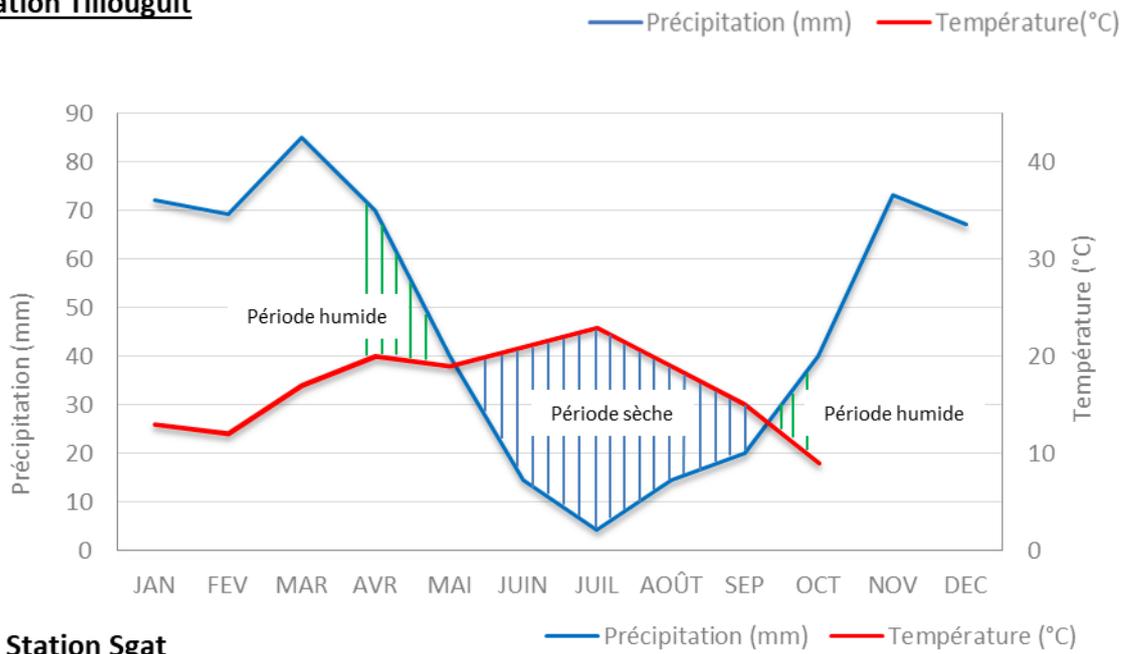
- La saison sèche s'étend sur 6 mois, de mai à octobre ;
- La saison humide de novembre à avril.

Tableau 1 : Type de bioclimat au niveau du bassin versant de l'oued El Abid

Stations	M°C	m°C	M-m °C	P (mm)	Q ₂	Bioclimat
Azilal (1430 m)	34.00	2.20	31.80	567.50	61.26	Semi-aride à hiver frais
Ait Mhamed (1680 m)	30.00	-2.40	32.40	465.70	50.08	Subhumide à hiver froid
Tillouguit (1200 m)	40.50	-4.08	44.58	395.30	30.43	Semi-aride à hiver très froid
Sgat	27.00	-4,5	31.50	575.2	64.2	Semi-aride à hiver tempéré



Station Tillouguit



Station Sgat

Figure 12 : Diagrammes de Bagnouls et Gaussen pour les stations de Tillouguit et Sgat

La situation des stations climatiques dans le climagramme (Figure 13) montre que le bassin versant de oued El Abid à l'amont du Barrage Bin El Ouidane s'étend sur différents étages bioclimatiques. En effet à Azilal, Sgat et à Tillouguit le bioclimat est du type semi-aride, alors qu'il devient subhumide à Ait Mhamed en montant en altitude.

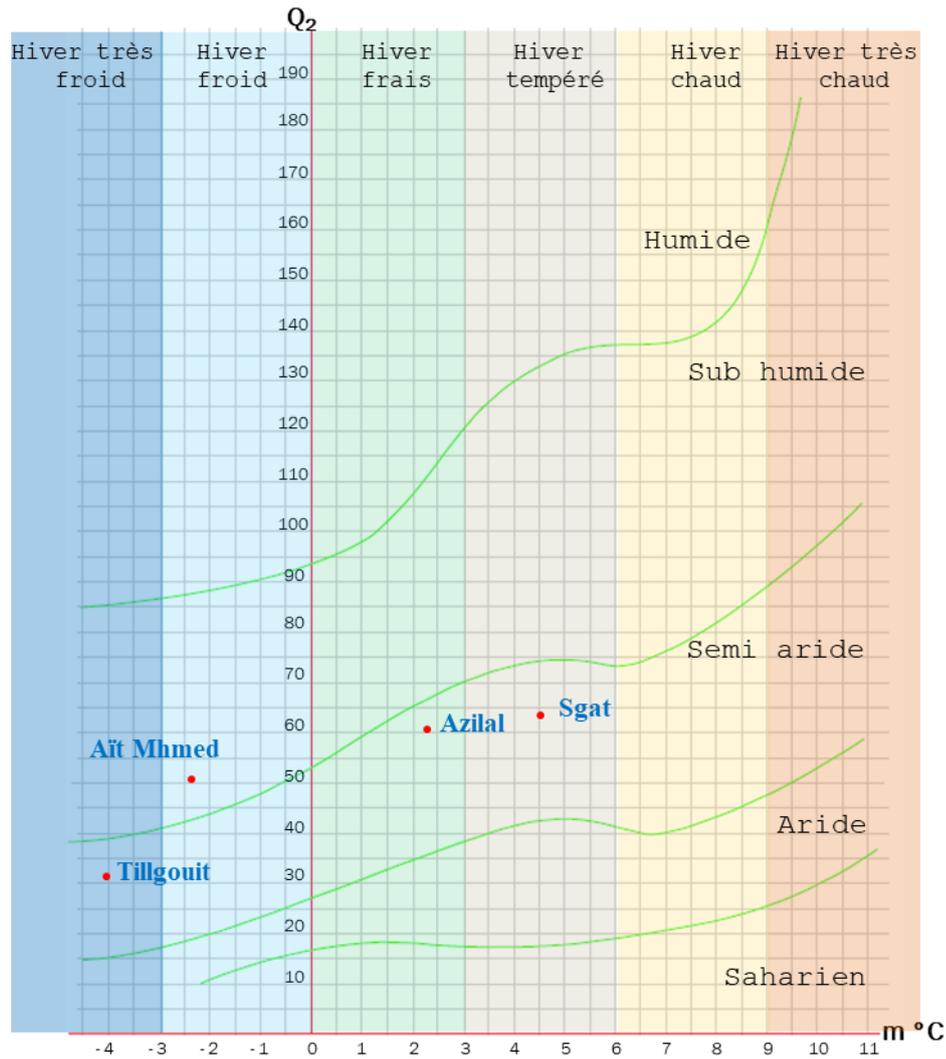


Figure 13 : Situation des stations climatiques de la zone d'étude dans le digramme d'Emberger

3. Contexte morphologique

L'hydrologie des cours d'eau du bassin versant de l'oued El Abid est principalement influencée par les caractéristiques morphologiques du bassin versant, à savoir son relief, sa forme ainsi que la connectivité de son réseau hydrographique. Ces paramètres sont importants dans l'étude physique du bassin versant en vue de caractériser son comportement hydraulique.

3.1. Le relief

La position géographique du bassin versant de l'oued El Abid, à cheval sur le Moyen et le Haut Atlas, lui confère un relief très diversifié. La topographie de la zone d'étude montre que les altitudes sont très variables de l'amont (sud et sud-est), à l'aval (nord et nord-ouest). Ces

altitudes peuvent être subdivisées en trois ensembles : les montagnes, les plateaux et les dépressions ou vallées (Figure 14) :

1. Les zones de montagne correspondant à des zones de hautes altitudes et qui occupent les zones sud et sud-est et représentent environ 46 % de la superficie totale du bassin versant, on peut citer :
 - Jbel Azourki (3677 m) dans le sous bassin versant d'Assif Ahnçal ;
 - Jbel Mourik avec une altitude de 3300 m ;
 - Les crêtes d'Idroute, du chitou Ijberten (2700 m) et Jbel Issoual (2800 m) forment une barrière élevée et compacte qui marque le paysage de cette partie du Haut Atlas central.
2. Les zones de plateaux qui correspondent à des zones de moyennes altitudes. Ils se répartissent sur la partie nord et nord-ouest, et représentent environ 28% de la superficie totale du bassin versant, à savoir :
 - le plateau d'Ait Abdi au sud du bassin versant avec des tranches d'altitude qui varient entre 2200 et 3000 m ;
 - Les plateaux des Lacs Isly et Tislit dominé par Jbel Bab n'Ouayad à l'est du bassin versant ;
 - Le plateau El Houanet au nord du bassin versant avec des tranches d'altitude qui varient entre 1000 et 2000 m ;
 - Le plateau d'Aït Mhmed, à l'ouest du bassin versant, est un synclinal à fond plat où prédominent les calcaires du Dogger. Il s'étend sur des altitudes variant entre 1700 et 2600 m. Il est délimité à l'est par Assif Ahnçal et son affluent Assif Wabzaza ;
3. Les zones de vallées et dépression, correspond à des zones de basses altitudes. Elles représentent environ 26 % de la superficie totale de la zone d'étude. Elles longent principalement les oueds et prennent parfois la forme de vallées évasés, parfois occupées par des cultures irriguées ou en sec ainsi que quelques zones urbanisées éparses. Les principales vallées sont celle de l'oued El Abid, Assif Ahnçal et Assif Melloul.

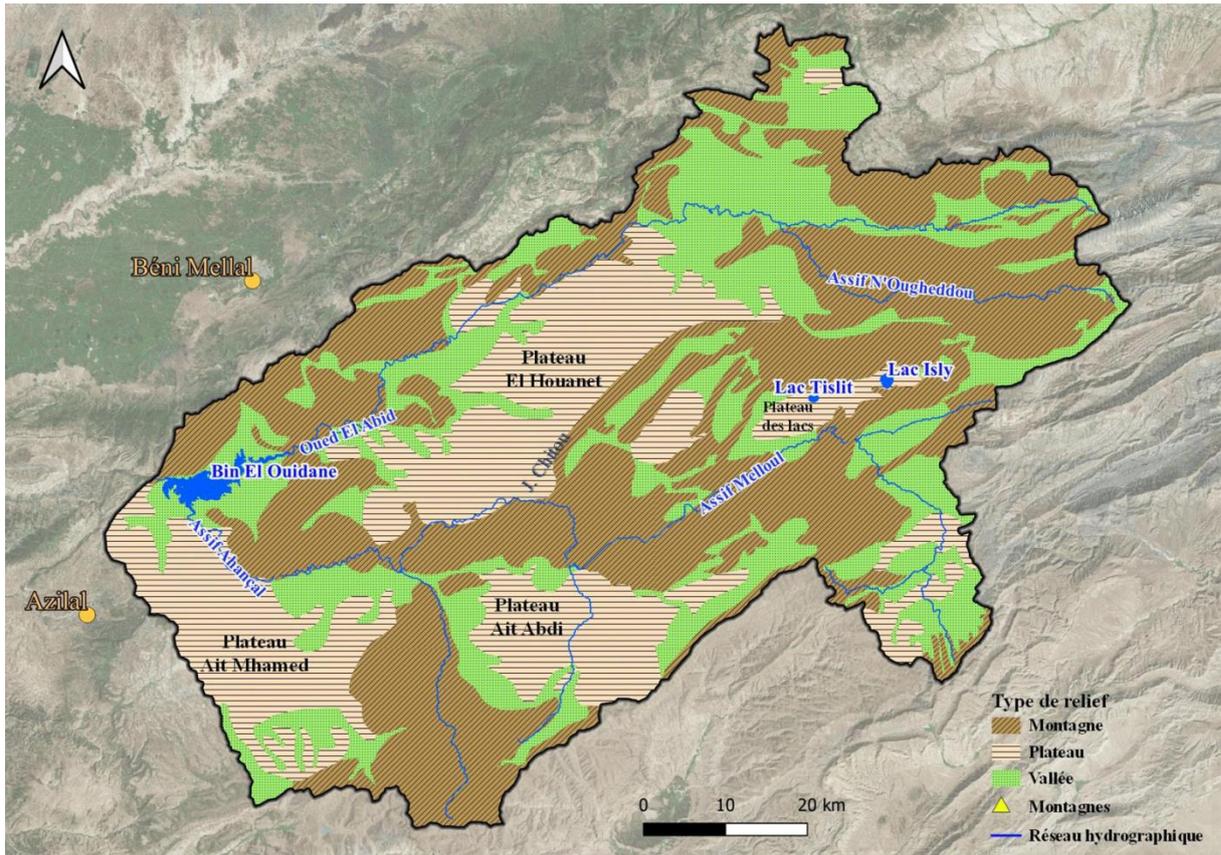


Figure 14 : Les grandes unités de relief du bassin versant de l'oued El Abid

3.2. La forme

3.2.1 L'indice de Gravelius

La forme du bassin oued El Abid est déterminée à l'aide de l'indice de compacité K_G (indice de Gravelius). Cet indice donne une idée sur la forme, du bassin versant, qui influence l'écoulement global des cours d'eaux et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin suite à une pluie donnée. Il est présenté par la formule suivante :

$$K_G = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \text{équation 2}$$

P : Périmètre (L)

S : Superficie (L²)

Si $1,5 < K_G < 1,8$: Le bassin versant est de forme allongée

Si $1,0 < K_G < 1,15$: Le bassin versant est de forme ramassée

Le bassin versant d'oued El Abid s'étale sur une superficie de 6537 km² et un périmètre de 488 km, d'où un indice de compacité de l'ordre de 1,69. Par conséquent, l'allure du bassin versant est assimilée à une forme allongée. Ainsi, le temps de concentration est assez long. Cependant, la forme allongée du bassin versant ne met nullement les populations à l'abri des inondations.

3.2.2 Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est une représentation géométrique du contour du bassin versant transformé en rectangle. Ce rectangle est tracé à partir de la longueur et de la largeur du bassin versant. Il est conçu pour pouvoir comparer les bassins versants du point de vue morphologique et pour permettre de connaître l'influence des caractéristiques morphologiques du bassin versant sur l'écoulement.

Les valeurs de la longueur (L) et de la largeur (l) du rectangle équivalent du bassin versant d'oued El Abid, correspondent respectivement à 213,35 km et 30,64 km, avec donc une longueur presque sept fois plus grande que la largeur (Figure 15). La surface totale qui en résulte est de 6537 km², conformément à la surface réelle du bassin versant.

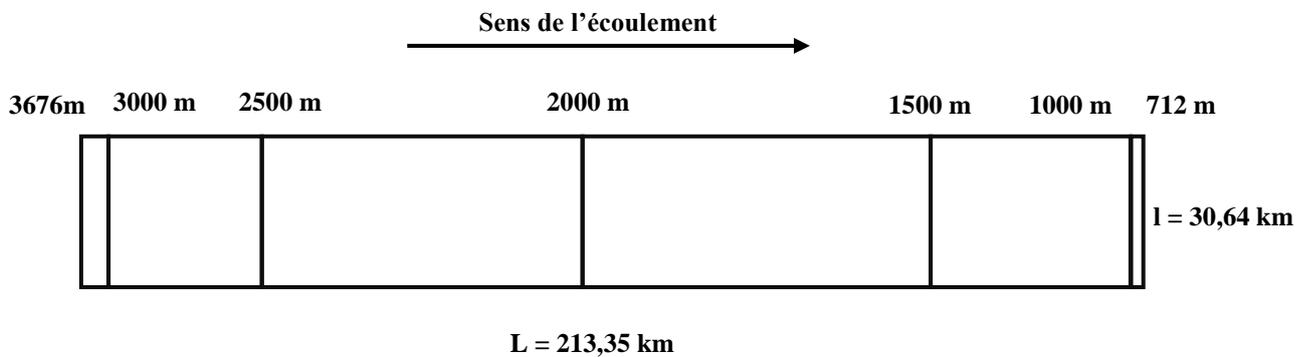


Figure 15 : Rectangle équivalent du bassin versant d'oued El Abid

Le rectangle équivalent montre que 63% de la superficie du bassin versant est occupée par des altitudes variant de 1500 à 2500 m, ce qui atteste d'une forte dynamique hydrologique au sein du bassin versant et par la suite un potentiel érosif important.

3.3. Les caractéristiques hypsométriques

3.3.1 Répartition spatiale de classes d'altitudes

L'étude des tranches d'altitudes du bassin versant de l'oued El Abid montre que l'altitude minimale est de 712 m au niveau de la retenue du barrage Bin El-Ouidane et l'altitude maximale est de 3676 m (Jbel Azourki) (Figure 16) (Tableau 2). Ceci constitue un gradient altitudinal important donnant lieu à de fortes pentes. Les écoulements se concentrent rapidement et s'encaissent au fond de vallées étroites. Les vitesses des eaux et leurs capacités de creusement (abrasion) et de transport se trouvent naturellement très fortes.

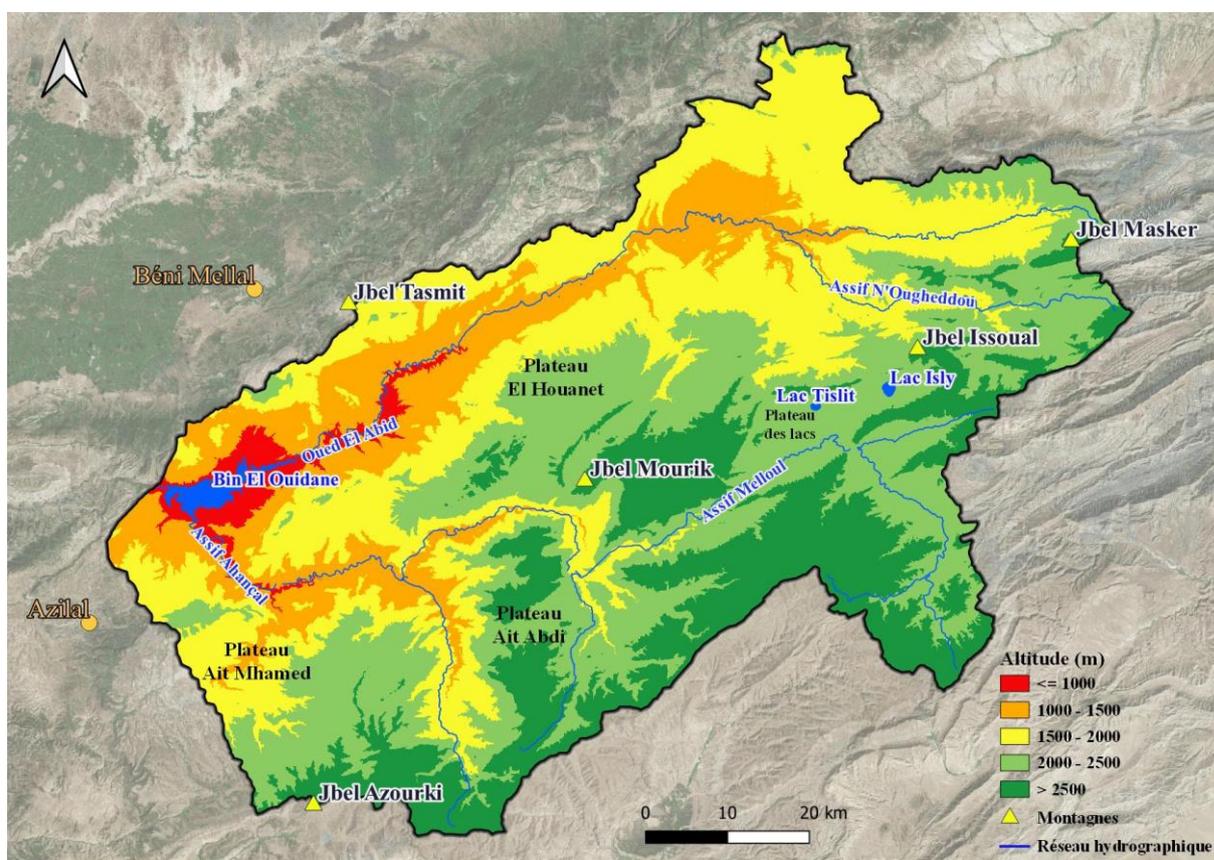


Figure 16 : Carte des altitudes du bassin versant d'Oued El Abid

Tableau 2 : Répartition des tranches d'altitude en fonction de leurs surfaces

Classe d'altitude (m)	surface (km ²)	% de la surface	surface cumulée %
712 - 1000	168.82	3	3
1000 - 1500	934.13	14	17
1500 - 2000	1990.79	30	47
2000 - 2500	2149.82	33	80
2500 - 3676	1293.47	20	100

Le tableau de répartition des classes d'altitude, du bassin versant, en fonction de leurs surfaces montre que les altitudes inférieures à 1500 m occupent 17% de la superficie du

bassin versant. Ces altitudes sont occupées essentiellement par des cuvettes et des synclinaux, à savoir le synclinal de Ouaouizerht et la zone du lac de Bin El Ouidane, le synclinal de Tizi n'Isly dans la partie nord du bassin versant, le synclinal de Tagleft traversé par oued El Abid au nord-est de la cuvette de Ouaouizerht, et du synclinal de Tilouguite traversé par Assif Ahançal au sud-est du lac de Bin El Ouidane.

Les altitudes comprises entre 1500 m et 2500 m forment la tranche dominante dans la zone d'étude. Elles occupent 63 % de la superficie totale du bassin versant. Ceci signifie que la majeure partie est occupée par des reliefs très accidentés, faits de montagnes et de crêtes. Ces tranches d'altitudes correspondent aux vallées d'Assif Ahançal et Assif Melloul, Jbel Abbadine avec une altitude de 2131 m, et aux parties dégradées des hauts plateaux des lacs, d'El Houanêt, d'Ait Abdi et d'Ait M'hammed.

Les hautes altitudes dépassant 2500 m représentent 20% du bassin versant. Elles se situent à l'est, sud-est et sud du bassin versant. Elles correspondent aux parties amont du bassin versant qui abritent les plus hautes crêtes et montagnes : Jbel Azourki (3697m), Jbel Laqroun (3105m), Jbel Mouriq (3101m) et Jbel Masker (3227m).

3.3.2 La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique permet de représenter la répartition des tranches d'altitude en fonction de leurs surfaces (Figure 17).

L'étude de l'hypsométrie permettra d'identifier la maturité du bassin versant de l'oued El Abid. Cette étude consiste en l'analyse des tranches d'altitude les plus dominantes et les plus représentatives du bassin versant. La Figure 17 représente la répartition des altitudes en fonction de leurs surfaces.

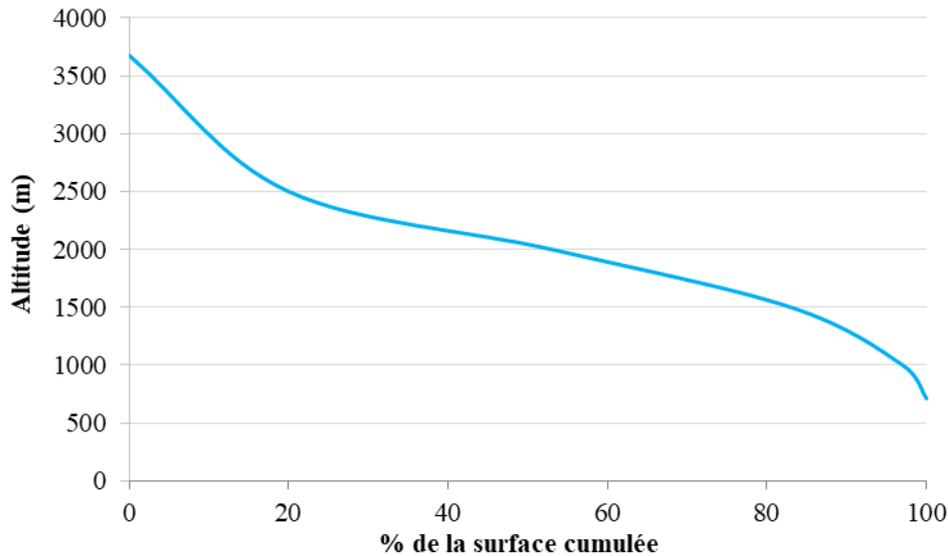


Figure 17 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued El Abid

L'allure de la courbe indique que le bassin versant de l'oued El Abid est dans un âge mature en état d'équilibre. Le graphe montre que 83% de la superficie du bassin versant est dominé par des altitudes supérieures à 1500 m. Selon cette forme hypsométrique à relief important la circulation des eaux à l'intérieur du bassin versant doit être facile et dynamique et par conséquent des pertes en terre importantes. Le rabaissement des hautes altitudes vers des plaines de sédimentation est potentiellement important.

3.3.3 La pente

La pente influe directement l'infiltration et le ruissellement. Ainsi, pour une même averse et à perméabilité équivalente, le partage des eaux entre écoulement superficiel et infiltration se fait essentiellement en fonction de la pente. Celle-ci intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur ; lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais celle du ruissellement augmente et le transport solide est amplifié.

La carte des pentes est déterminée à partir d'un modèle numérique du terrain (MNT) de 30 m de résolution (Figure 18).

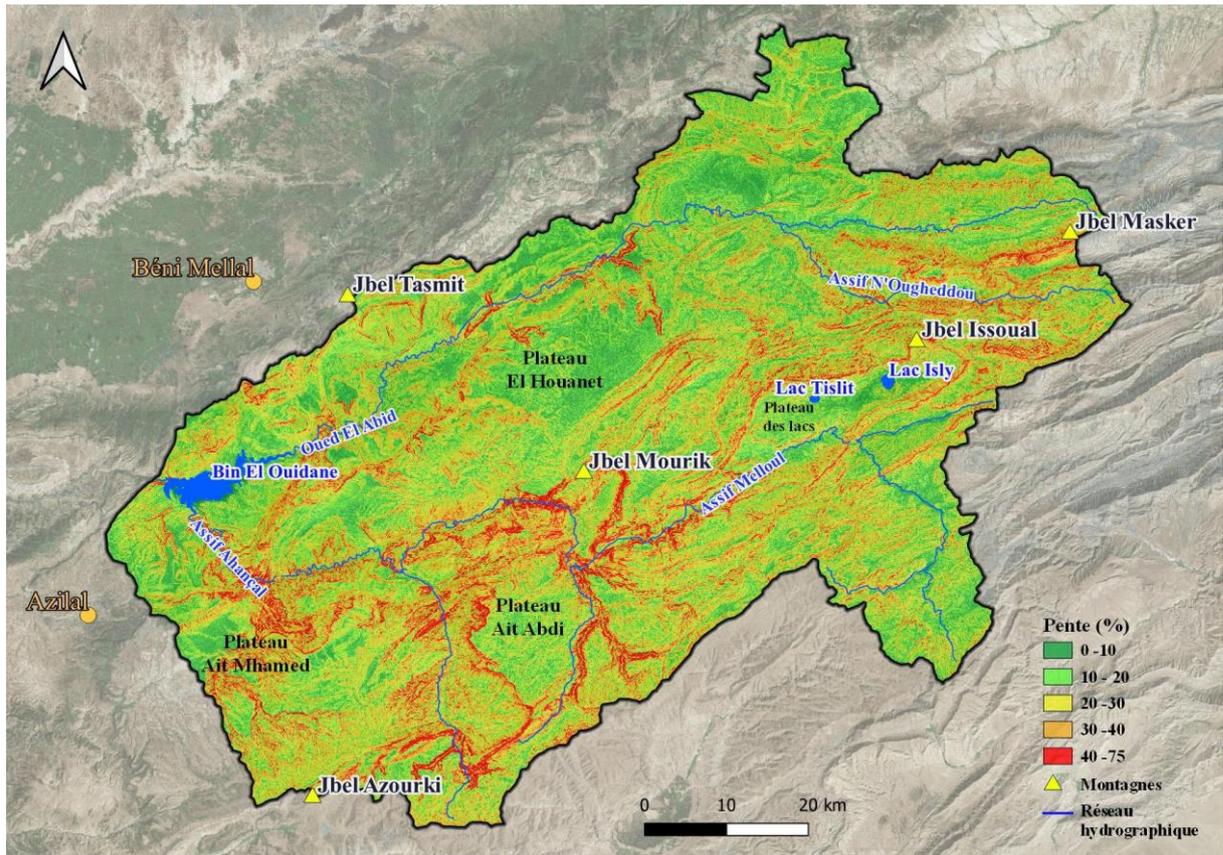


Figure 18 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued El Abid

L'analyse de la répartition des classes des pentes par rapport à la superficie du bassin versant de l'oued El Abid (Tableau 3) montre qu'il est dominé par un relief modérément accidenté. Néanmoins, des pentes fortes à très fortes (20 à 75%) se localisent dans la partie sud, nord-est et sud-ouest du bassin versant et représentent près de 37% de la superficie totale du bassin versant. Ces zones montagneuses sont particulièrement vulnérables aux écoulements torrentiels, qui peuvent engendrer des inondations brutales, ainsi que des coulées boueuses en cas de forte charge solide. Les pentes faibles (0 à 20%) représentent 63% de la superficie totale du bassin versant. Elles sont globalement localisées dans la partie aval du bassin versant et en fonds de vallée.

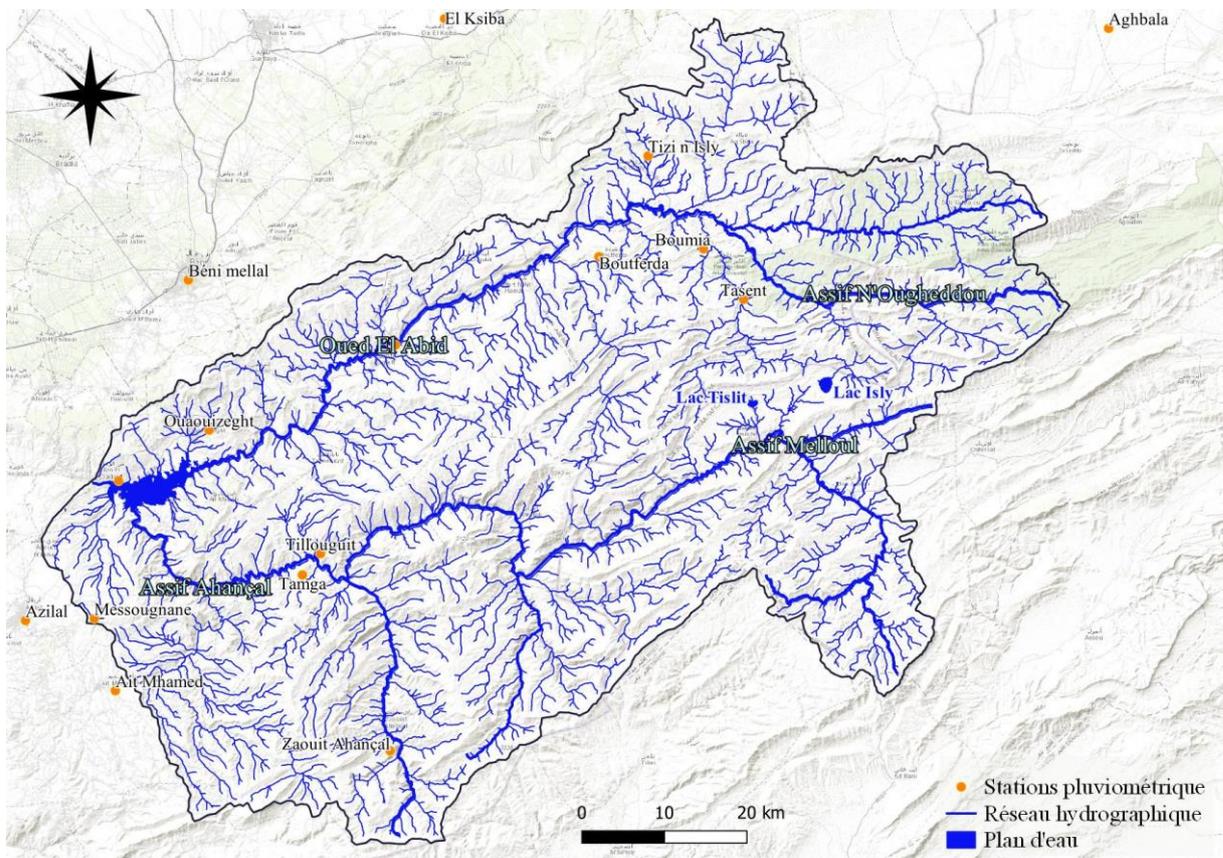
Tableau 3 : Répartition des classes de pentes en fonction de la superficie du bassin versant

Classe des pentes (%)	Superficie (km ²)	Superficie (%)
0 - 10	1860	28
10 - 20	2312	35
20 - 30	1676	26
30 - 40	566	9
40 - 75	123	2

4. Contexte hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued El Abid (Figure 19) a été reconstruit à partir des données ASTER GDEM (résolution de 30 m). La longueur totale du réseau hydrographique de la zone d'étude est d'environ 4831 km. Les principaux cours d'eau qui drainent le bassin versant et alimentent le barrage Bin El Ouidane sont :

- Assif Ahnçal et Assif Melloul dans la partie sud et sud-est. Ces deux cours d'eau naissent dans les chaînes de montagnes de la zone d'étude (Jbel Azourki, 3691 m)
- Oued El Abid et Assif Oughddou dans la partie nord et nord est qui prennent source au niveau de Jbel Masker (3277 m). Leur confluence a lieu au niveau de Taadlount.



4.1. La densité du drainage

Le réseau hydrographique peut être caractérisé par sa densité de drainage, définie comme le ratio entre la longueur totale du réseau hydrographique par la surface du bassin versant.

Avec une longueur totale du réseau hydrographique de 25 420 km, et une surface de 6 537 km², la valeur de densité de drainage obtenue pour le bassin versant d'oued El Abid est égale à 3.88 km⁻¹. Une telle valeur indique que ce bassin versant est densément drainé.

Cependant, le risque de crue est aussi fonction de la perméabilité des formations lithologiques. Il reste élevé dans le cas de formations imperméables dans les vallées encaissées à forte pente.

4.2. La hiérarchisation du réseau hydrographique

La classification adoptée pour la hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued El Abid s'est basée sur le principe de la méthode de Strahler (1952) [102]. Sur le plan géomorphologique, cette classification, où aucun cours d'eau ne conserve le même ordre sur toute sa longueur, répond bien aux caractéristiques réelles d'un réseau hydrographique.

La carte de la répartition des cours d'eau du bassin versant de l'oued El Abid (Figure 20) montre que le réseau hydrographique couvre d'une façon homogène et régulière la totalité de la superficie de la zone d'étude, en accord avec la densité de drainage calculée précédemment.

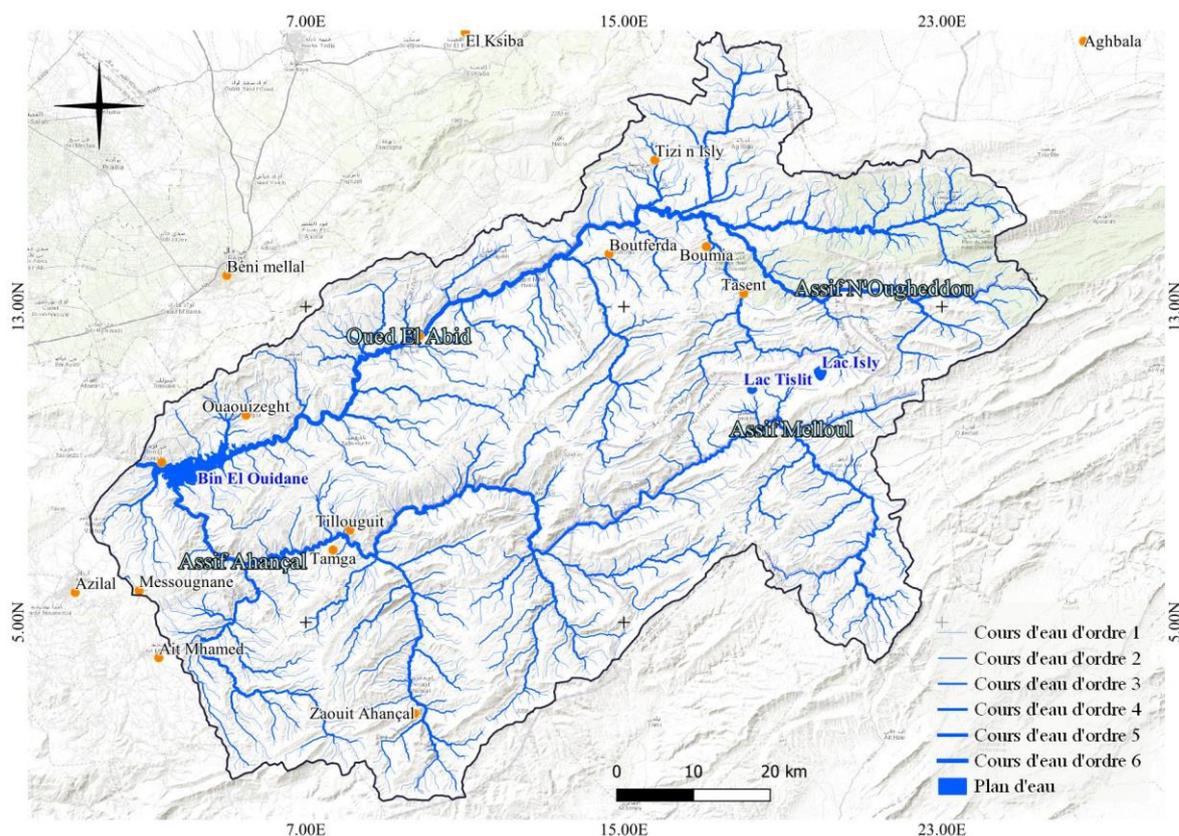


Figure 20 : Classification des cours d'eaux du bassin versant de l'oued El Abid

5. Contexte géologique

Le Haut Atlas central est caractérisé par une diversité géologique importante. Il renferme des structures géomorphologiques particulières et des formations lithologiques variées datant du Trias jusqu'au Crétacé. La connaissance de la géologie locale est indispensable pour la compréhension du devenir des eaux météoriques, en raison de ses caractéristiques hydrodynamiques (porosité, perméabilité) et de structures particulières (zones karstiques). La Figure 22 montre les différentes formations géologiques présentes dans la zone d'étude. Quelques coupes sont également reportées en Figure 21 afin d'illustrer les successions lithologiques caractéristiques du bassin à l'amont du barrage Bin El Ouidane [103] [104] :

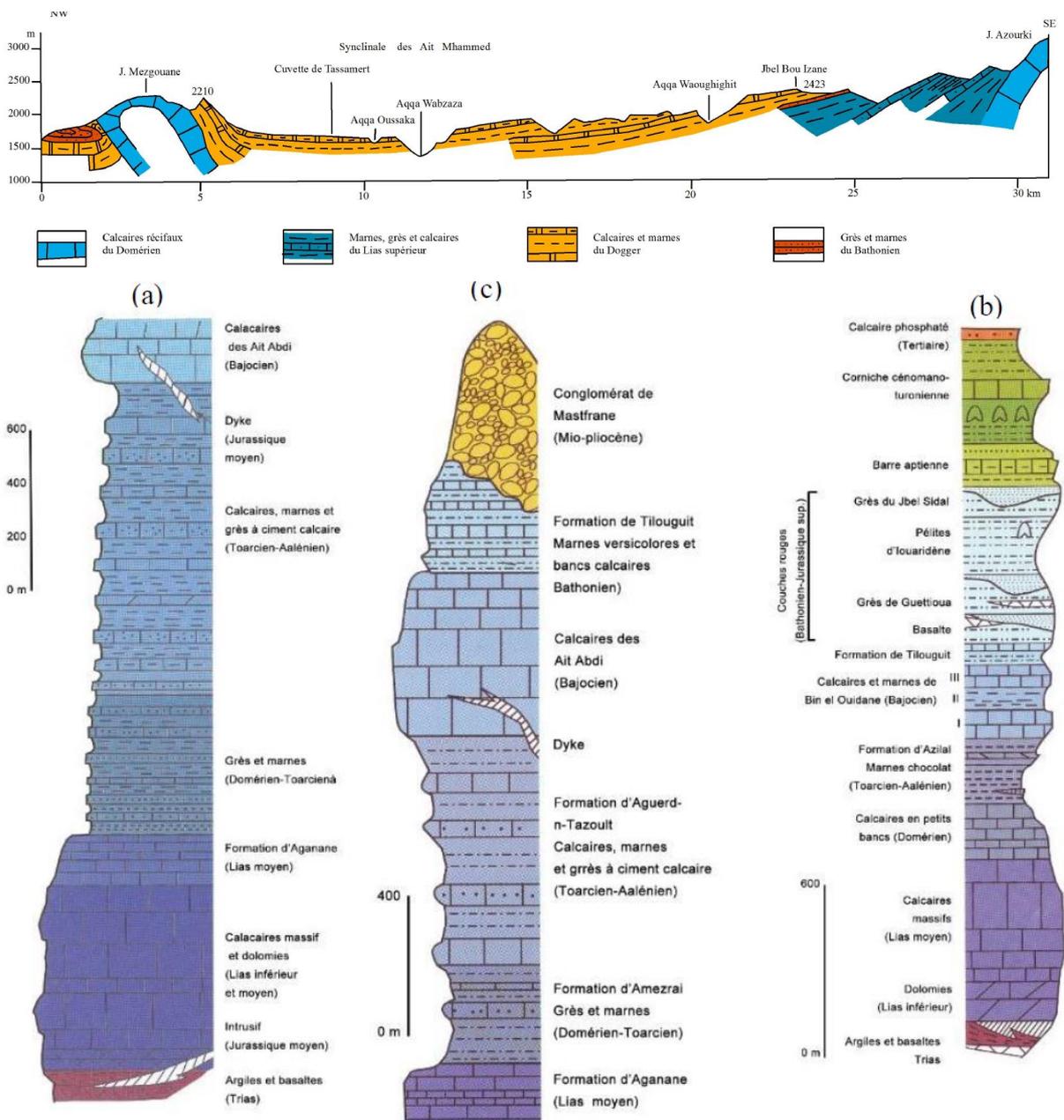


Figure 21 : Coupe géologique et log stratigraphique de la zone d'étude
source : [104]

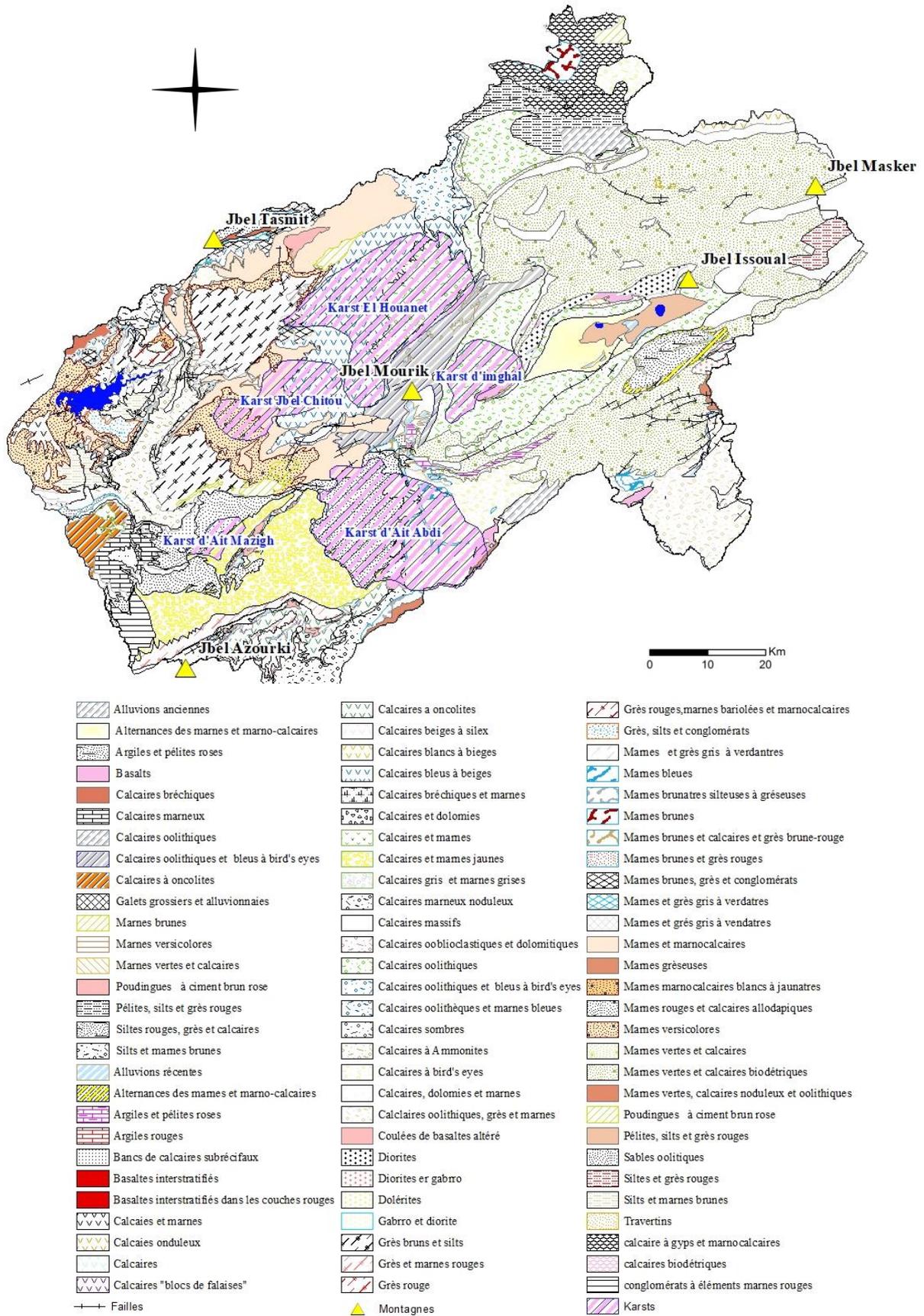


Figure 22 : Carte géologique du bassin versant de l'oued El Abid

Trias : Les formations de cet étage géologique sont constituées de basaltes doléritique, de grès, de marnes et d'argiles rouges typiques qui affleurent au nord-ouest de la mine de Tazoult ainsi qu'au sud et au sud-ouest du village de Zaouiat Ahançal. Les marnes et les argiles sont des niveaux salifères, elles jouent un rôle de substitution imperméable de la série jurassique et constituent le plus souvent l'origine de la salinité de la région.

Jurassique : Il est représenté par le Lias et le Dogger. Les formations du Lias comprennent de bas en haut, des calcaires massifs à gros lamellibranches (Lias inférieur moyen) puis des calcaires lités bio-détritiques, rapportés au Lias moyen à supérieur. Au Toarcien s'instaure une sédimentation à caractère détritique à dominance gris-brun à beige. Quant au Dogger il est l'étage géologique le plus affleurant dans la région. Il comprend, de bas en haut, les faciès suivants :

- ✓ des alternances de marnes, de marno-calcaires, de grès argileux, qui peuvent atteindre 600 m d'épaisseur ;
- ✓ des "calcaires corniches", déposées à l'aléno-bajocien dans un domaine paléogéographique de plate-forme carbonatée ;
- ✓ les silts et pélites de la formation de Tillouguit, alternativement brun-rouge lie-de-vin, beige et gris ;
- ✓ les grès rouges continentaux du Bathonien, qui occupent tout le fond du bassin de Tillouguit où l'oued Ahançal a creusé son lit.

Tertiaire : Le tertiaire est représenté par la puissante formation conglomératique ponticopliocène, reposant en discordance sur tous les termes du jurassique moyen.

Quaternaire : Le quaternaire se résume en un chapelet de cônes d'éboulis et de brèches, en partie cimentés par de la calcite, au pied des falaises calcaires, ainsi qu'en des amas alluvionnaires au fond des principaux thalwegs. Ces formations sont sujettes à des formes d'érosion intenses allant de l'érosion diffuse, sur pentes douces, à des érosions en rigoles ou du ravinement lorsque les pentes sont plus fortes [103].

6. Contexte hydrogéologique

À l'échelle du bassin versant d'oued El Abid, l'hétérogénéité des formations lithologiques et le contraste des structures et reliefs lui confère un comportement hydrologique et hydrogéologique très particulier. Le substratum du bassin versant est constitué essentiellement de roches carbonatées, incluant les calcaires du Lias et du Dogger marin ainsi que des dolomies. Cette constitution en roches carbonatées perméables (51% de la superficie totale) accorde au bassin versant un réservoir des ressources en eau souterraines considérables.

La classification lithologique et géologique précédente permet de déterminer trois grandes catégories de roches en termes de perméabilité :

- Roches perméables : Il s'agit des roches carbonatées, constituées essentiellement des calcaires et dolomies, ces roches favorisent l'infiltration des eaux par le biais des interstices et les fissures.
- Roches semi-perméables : il s'agit des couches imperméables sédimentées en alternance avec les roches perméables.
- Roches imperméables : elles sont constituées de roches sédimentaires imperméables (marnes, argiles...) et des roches magmatiques (gabbro et basaltes).

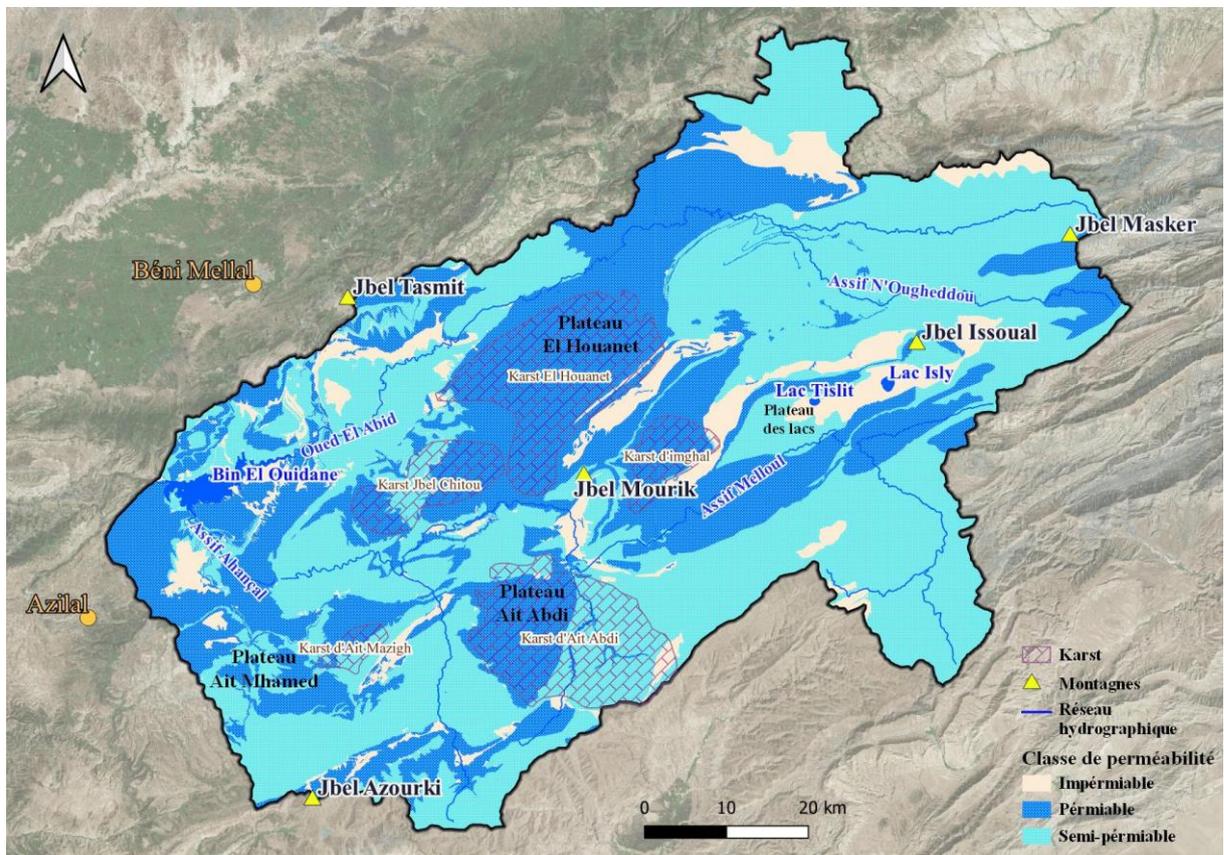


Figure 23 : Perméabilité des formations lithologique du bassin versant

7. Contexte pédologique

Les caractéristiques pédologiques des sols déterminent leur aptitude à accueillir du ruissellement d'une part et leur susceptibilité à s'éroder d'autre part. En effet, le taux d'infiltration, le taux d'humidité dans le sol, la capacité de rétention, les pertes initiales et le coefficient de ruissellement sont fonctions du type de sols et de son épaisseur.

Le bassin versant de l'oued El Abid est dominé par des sols squelettiques à faible capacité d'infiltration et de stockage d'eau [103], à savoir :

- **Sols minéraux bruts ou peu évolués** - Cette catégorie de sols est composée de 2 types :
 - les sols à minéraux bruts qui apparaissent sur les versants en forte pente des ravins, souvent sur des marnes, des grès ou des pélites ;
 - les sols peu évolués lithiques qui se développent sur des roches mères souvent de type calcaire.
- **Sols calcimagnésiques** - Ces sols sont riches en terre fine silicatée, notamment en argiles (sols fersialitiques). On distingue :
 - les sols bruns calcaires, développés sur du matériel colluvial, du calcaire ou encore des marnes ;
 - les sols bruns calciques se développent surtout sur des colluvions. Ce type de sol présente un caractère vertique lui conférant une grande susceptibilité à l'érosion ;
 - les sols rouges fersialitiques ;
 - les sols brun-rouge calciques.
- **Les sols isohumiques** - Cette catégorie de sols est présente à une très faible proportion dans la zone d'étude (sol hydromorphe à proximité directe du réseau hydrographique).

Les sols dans la zone d'étude sont soumis à différents usages dont particulièrement :

- **Les sols forestiers** - Ces sols supportent des formations forestières de différentes essences : pins d'Alep, chênes verts, thuyas et cèdres principalement.
- **Les sols agricoles** - Les sols agricoles peuvent être divisés en deux groupes : les sols utilisés pour l'agriculture sèche et ceux irrigués. Les premiers sont des enclaves dans les formations forestières qui sont exploités principalement pour la céréaliculture (principalement l'orge et le blé dur). Quant aux terres irriguées, elles sont localisées soit le long d'un cours d'eau lorsque son lit majeur est assez large et présente des terrasses de dépôts, soit sur des terrasses horizontales sur pentes. Les assolements dans ces terres irriguées sont variés, incluant légumes et arbres fruitiers (olivier, pommiers, cognassiers, figuiers, etc.).

8. Occupation des sols

8.1. Végétation

La zone d'étude est caractérisée par une considérable diversité du couvert végétal. Cependant, la densité dudit couvert est très variable, en raison des différentes conditions d'altitude, d'exposition et du contexte édaphique. Les espèces forestières dominantes dans le bassin versant sont :

Le chêne vert (*Quercus rotundifolia*) est la principale essence forestière par sa surface et pour son usage en bois de chauffe. Un peuplement âgé et sans mélange d'essence est présent dans la partie nord-ouest du bassin versant. Les chênaies vertes se trouvent aussi associées à d'autres espèces, notamment les genévriers oxycèdre, rouge et thurifère ou encore le thuya, au sud-est, à l'est ainsi qu'au nord du bassin versant.

Le chêne vert se développe à des altitudes situées entre 700 et 2700 mètres (Photo 7). Il est généralement très abondant sur les versants nord correspondant aux étages bioclimatiques de type humide, subhumide, localement semi-aride, tempéré, frais et froid. En outre, cette espèce végétale est caractérisée par sa capacité de coloniser tous les types de substrat géologique, du fait de sa plasticité écologique et de sa rusticité.

Les forêts les plus développées abritant des chênes verts s'étendent le long des versants de la vallée de l'oued El Abid. Il s'agit des forêts d'Ait Daoud Ou-Ali, des Ait Abdi de l'Est et d'Ait Hmama. Du côté des vallées de l'Assif Ahançal et de l'Assif Melloul, seule la partie sud du sous bassin versant abrite des peuplements importants (Azilal, Wabzaza et Zawyat Ahançal).



Photo 7 : Chênaies vertes dans le bassin versant de l'oued El Abid

Les genévriers sont représentés par trois espèces dans le bassin versant de l'oued El Abid :

- le genévrier rouge (*Juniperus phoenicea*) (Photo 8) qui occupe une grande partie des vallées de l'oued El Abid et d'Assif Ahnçal, sur leur moitié aval. Il se développe sur des altitudes comprises entre 1000 m et 2200 m.
- le genévrier thurifère (*Juniperus thurifera*) (Photo 8) se trouve souvent en contact avec le genévrier rouge. Il longe le plateau d'El-Houanêt, la région d'Anergui, les hauts plateaux d'Ait Abdi du Kousser et Zawyat Ahnçal. Il est également disséminé au sud du bassin versant au niveau du Jbel Azourki. Certains peuplements peuvent atteindre des altitudes de 3000 m, comme c'est le cas au niveau des hauts plateaux d'Ait Abdi du Kousser. Bien qu'indifférent vis-à-vis de la nature du sol, on le retrouve le plus souvent sur des calcaires.
- le genévrier oxycède (*Juniperus oxycedrus*) se développe aussi conjointement au genévrier rouge. Ainsi Les oxycèdres sont dispersés sur l'ensemble du bassin versant.



Photo 8 : Thuya (gauche) et thurifère (droite)

Le pin d'Alep peuple la vallée d'Assif Ahnçal, formant la forêt de Tamga entre Tillouguite et Zawyat Ahnçal. Il se retrouve également dans la partie amont du bassin versant de l'oued El Abid, sur les versants nord des plateaux des lacs, en îlots et en mélange avec des chênes verts et des genévriers rouges (Photo 9).



Photo 9 : Pin d'Alep dans la zone d'étude

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) se trouve souvent associé au chêne vert dans la partie orientale du bassin versant. Il se développe à des altitudes comprises entre 1600 m et 2400 m (Photo 10).



Photo 10 : Cèdre d'Atlas

Le thuya de Berbérie (*Tetraclinis articulata*) se développe uniquement dans la partie aval du bassin versant, au bord de l'oued El Abid, et plus précisément dans la partie inférieure du bassin de Tagleft et d'Ouaouizerht. En effet, cette essence est inféodée à de basses altitudes (Photo 11).



Photo 11 : Thuya de Berbérie

Ces formations forestières font partie du domaine privé de l'Etat. Des plans d'actions pour la préservation de ces ressources forestières sont mises en place. Cependant, la population et les administrations locales ne sont pas associées, empêchant d'aboutir à des résultats satisfaisants. En effet, les populations utilisent illégalement le domaine forestier pour divers besoins :

- Bois de feu et de construction : La majorité de la population de la zone d'étude utilise le bois de la forêt pour les besoins de cuisson et chauffage. Les besoins en bois de feux sont estimés à 2 tonne /famille/ an. Les habitants utilisent aussi le bois pour la construction d'habitation (maison, étables, écuries, bergeries...).
- Alimentation fourragère : Durant plusieurs mois de l'année, les arbres forestiers demeurent la seule ressource pastorale pour répondre aux besoins du cheptel, qui est en majorité constitué de caprins. Le feuillage du chêne vert, sa production fruitière (glands) et les branches de thuya offrent des possibilités fourragères vitales en période de sécheresse, de soudure et d'enneigement. Les écimages de chêne vert, et de thuya, sont des pratiques courantes dont l'intensité est variable selon les années [103].

8.2. Pratiques antiérosives

Les conséquences de l'érosion hydrique sont perçues, avec le plus d'acuité au niveau de l'envasement des barrages Bin El Ouidane (Photo 12). Cette section recense les dispositifs mis en place pour lutter contre cette situation.



Photo 12 : Envasement du barrage Bin El Ouidane

Les aménagements antiérosifs mis en place dans la région d'étude ont comme objectifs de maîtriser l'érosivité du ruissellement et réduire l'érodibilité de la surface. Les principales méthodes sont décrites et organisées en fonction des facteurs sur lesquels agissent les techniques de lutte contre l'érosion.

En matière de traitement des zones touchées par l'érosion hydrique, il est recommandé d'appliquer un traitement à deux volets :

- Un volet mécanique : consistant à implanter un réseau de seuils aux niveaux des ravins ;
- Un volet biologique : nécessitant la végétalisation des versants et des ravins.

8.2.1 Correction mécanique

Les traitements mécaniques consistent en la création des obstacles de consolidation transversaux, perpendiculaires à l'axe d'écoulement. Les ouvrages de traitement mécanique ont pour but de ralentir ou d'empêcher le ruissellement et d'augmenter l'infiltration de l'eau en diminuant ainsi sa force érosive, ce qui assure le dépôt des sédiments et évite que des charges solides ne s'incorporent au courant. L'efficacité des corrections mécaniques dépend de la durabilité de l'ouvrage, pour cela une réelle solidité, par l'emploi de matériaux convenables et une construction soignée, doit être apportée au seuil.

Cordons en pierres sèches

Ce sont des murets en pierres sèches confectionnés et disposés suivant les courbes de niveau. Derrière cet obstacle perméable, les eaux de ruissellement et les travaux du sol accumulent progressivement des sédiments sur lesquels vont se développer des arbres de consolidation (arbres arboricoles ou arbustes fourragers). C'est une technique peu coûteuse, qui contribue aux ralentissements des ruissellements et au piégeage des sédiments.



Photo 13 : Cordons en pierres sèche le bassin versant de l'oued El Abid

Seuils en pierres sèches

Ces ouvrages consistent en des assemblages de pierres non cimentées. Ils permettent d'arrêter l'érosion latérale provoquée par les crues et de stabiliser les lits des ravins érodés par le creusement vertical. Il s'agit d'ouvrages filtrants qui servent à piéger les sédiments et à ralentir le ruissellement. Du fait de manque de cohésion entre les pierres, la mise en place des pierres sèches est faite soigneusement, avec une profondeur allant jusqu'à 1,50 mètre pour stabiliser l'ouvrage.

Seuils en gabions

Ce sont des ouvrages filtrants utilisés à l'origine en protection de pied de berge de rivière, mais ils sont également utilisés comme ouvrage de lutte contre l'érosion. Ils servent à ralentir les ruissellements et permettent la rétention d'une grande partie des sédiments. Le gabion est une cage métallique remplie de matériaux locaux (pierres naturelles de différentes tailles). Ses pierres ne doivent pas être friables ni gélifiées mais de dimension plus grande que celle de la maille du grillage. Les seuils en gabion sont particulièrement recommandés pour les terres argileuses ou marneuses [105] (Photo 14).



Photo 14 : Seuils en gabion à l'aval du barrage Bin El Ouidane

Seuil en maçonnerie

Ces ouvrages sont des barrages construits avec des pierres cimentées ou du béton, souvent sur des terrains rocheux, et qui sont implantés transversalement dans les lits des gros ravins. Ils permettent d'éviter le creusement du lit et maintiennent la stabilité des berges et des versants. Ces barrages sont solides, durent longtemps et permettent, lorsqu'ils sont associés à d'autres types de seuils, de corriger le profil en long du ravin. L'inconvénient de ces ouvrages est qu'ils sont très coûteux, nécessitent une main d'œuvre qualifiée et ne sont pas adaptés des terrains très argileux (pas suffisamment plastiques faces aux mouvements qu'impliquent les cycles de gonflement-séchage des argiles).



Photo 15 : Seuil en gabion dans le sous bassin versant oued Ahnçal

8.2.2 Correction biologique

Le traitement biologique consiste à planter des espèces végétales permettant de protéger ou de stabiliser les sols contre les différentes formes d'érosion.

Le matériel végétal peut être des grandes boutures d'espèces ligneuses, soit des plantes comme le sisal et des graminées. Ces espèces végétales ont un effet très bénéfique sur l'infiltration et le temps de concentration des eaux, et du même coup, exercent un contrôle efficace sur le ruissellement superficiel et le débit des crues.

Bandes enherbées

Ce sont des bandes de cultures pérennes (espèces fourragères, etc.) (Photo 16) plantées en courbes de niveau afin de fractionner la longueur de la pente et ainsi diminuer l'énergie générée par les ruissellements qui arrachent les particules des sols.



Photo 16 : Bandes de cultures dans le bassin versant de l'oued El Abid

Reboisement

En général, l'emploi d'un couvert végétal constitue un moyen très efficace de lutte contre l'érosion. En effet, il offre une très bonne protection à la surface du sol en interceptant l'énergie cinétique des gouttes de pluie et en réduisant le ruissellement de surface. Selon les recommandations de la FAO, la végétation devrait recouvrir au moins 70% de la surface du terrain pour assurer un couvert adéquat contre l'érosion hydrique.



Photo 17 : Reboisement du cèdre de l'Atlas, amont de l'oued El Abid



Photo 18 : Plantation forestière de cyprès de l'Atlas dans le bassin versant de l'oued El Abid



Photo 19 : Plantation forestière cyprès d'Arizona dans le bassin versant de l'oued El Abid

8.2.3 Combinaison des deux corrections

Une double protection des versants peut être assurée par la combinaison des deux corrections : mécanique et biologique (Photo 20).



Photo 20 : Combinaison des corrections mécanique et biologique

Chapitre 2 : Présentation de la région Nord-Pas-de-Calais (France)

1. Situation géographique

Le Nord Pas-de-Calais est une ancienne région française qui s'étend sur une superficie de 12 480 km². La région est bordée au sud par la Picardie, à l'est par la Belgique, au nord-ouest par la Mer du Nord, à l'ouest par la Manche (Figure 25).

Deux grandes unités géomorphologiques d'orientation NO-SE peuvent y être distinguées : le Haut-Pays et le Bas-Pays. Le Haut-Pays culmine à 270 m et correspond à l'anticlinal de l'Artois et à l'extrémité sud-est des Ardennes (sub-région du Hainault et de l'Avesnois).

Dans cette unité, les altitudes les plus fréquentes varient de 180 m à 270 m et les pentes de 2 % à 15 %. Le Bas-Pays est constitué de plaines basses sub-horizontales (Flandres) et de plaines faiblement ondulées, avec des pentes de moins de 2 %. Les altitudes des plaines basses sont inférieures à 20 m alors que celles des plaines ondulées varient entre 2 m et 50 m, sauf au niveau de buttes témoins (Monts des Flandres) dont les sommets atteignent de 139 m à 176 m.

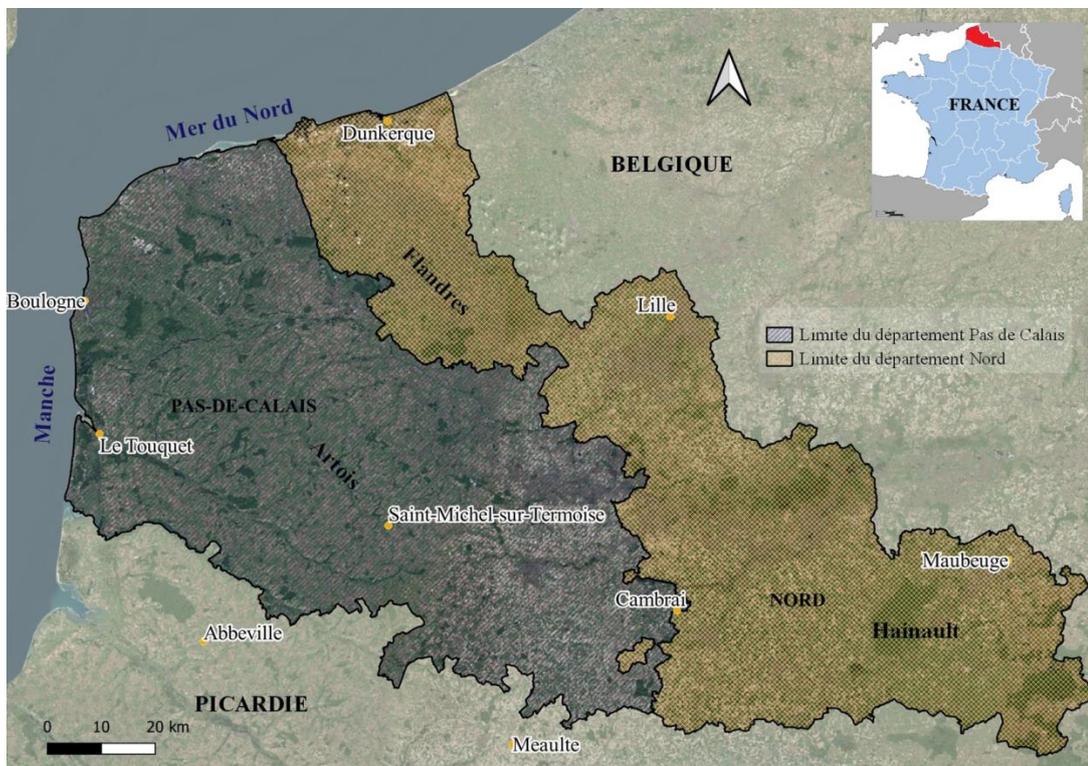


Figure 25 : Situation géographique de la région Nord-Pas-de-Calais

2. Contexte climatique

L'emplacement géographique côtier de la région Nord-Pas-de-Calais lui confère un climat océanique, caractérisé par des précipitations modérées (entre 600 et 900 mm / an), bien réparties dans l'année. Les amplitudes thermiques saisonnières sont faibles et centrées sur une moyenne annuelle tempérée (entre 10 et 11°C).

Le régime maritime de la région est caractérisé par des vents dominants d'ouest. Ainsi, la frange littorale ouest, et en particulier la partie la plus méridionale (Le Touquet), enclavée par les Monts de l'Artois, reçoit plus de précipitations que la côte de la Mer du Nord (Dunkerque). Les flux entrant dans les terres s'accumulent ensuite à la rencontre des contreforts des Ardennes, à l'extrémité est de la zone d'étude (Maubeuge), occasionnant de même une pluviométrie plus importante (Figure 26).

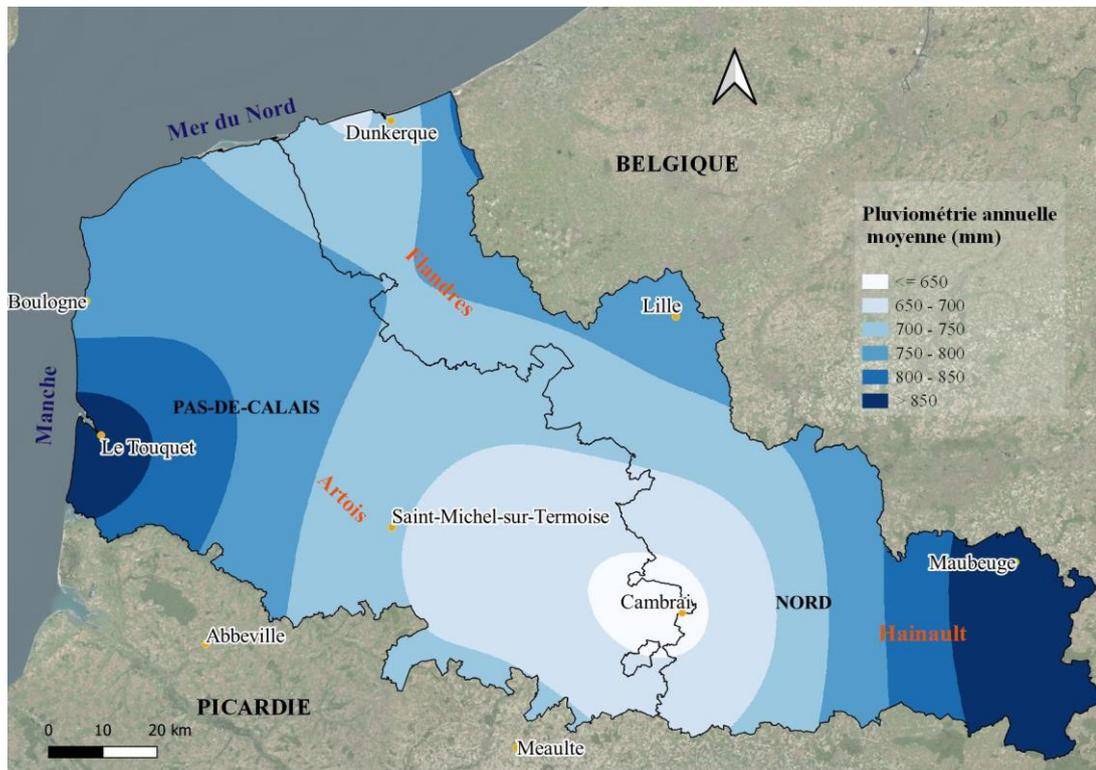


Figure 26 : Pluviométrie moyenne annuelle en Nord-Pas-de-Calais
source : Infoclimat (1980-2010)

Outre ces disparités pluviométriques, le Nord-Pas-de-Calais connaît aussi un gradient de continentalité, illustré par des amplitudes thermiques croissantes sur l'axe est-ouest. Ainsi, les hivers dans les terres sont 2 à 3°C plus froids que sur la côte en moyenne, les étés 2 à 4°C plus chauds (Figure 27). La douceur des étés peut être accentuée par un flux de sud amenant un air sec et chaud, de manière plus ou moins marquée selon les années.

De même, selon les années, des flux continentaux d'est peuvent générer des hivers plus froids mais secs, expliquant par la même une variabilité pluviométrique interannuelle significative avec un maximum en novembre et des minima en février et avril.

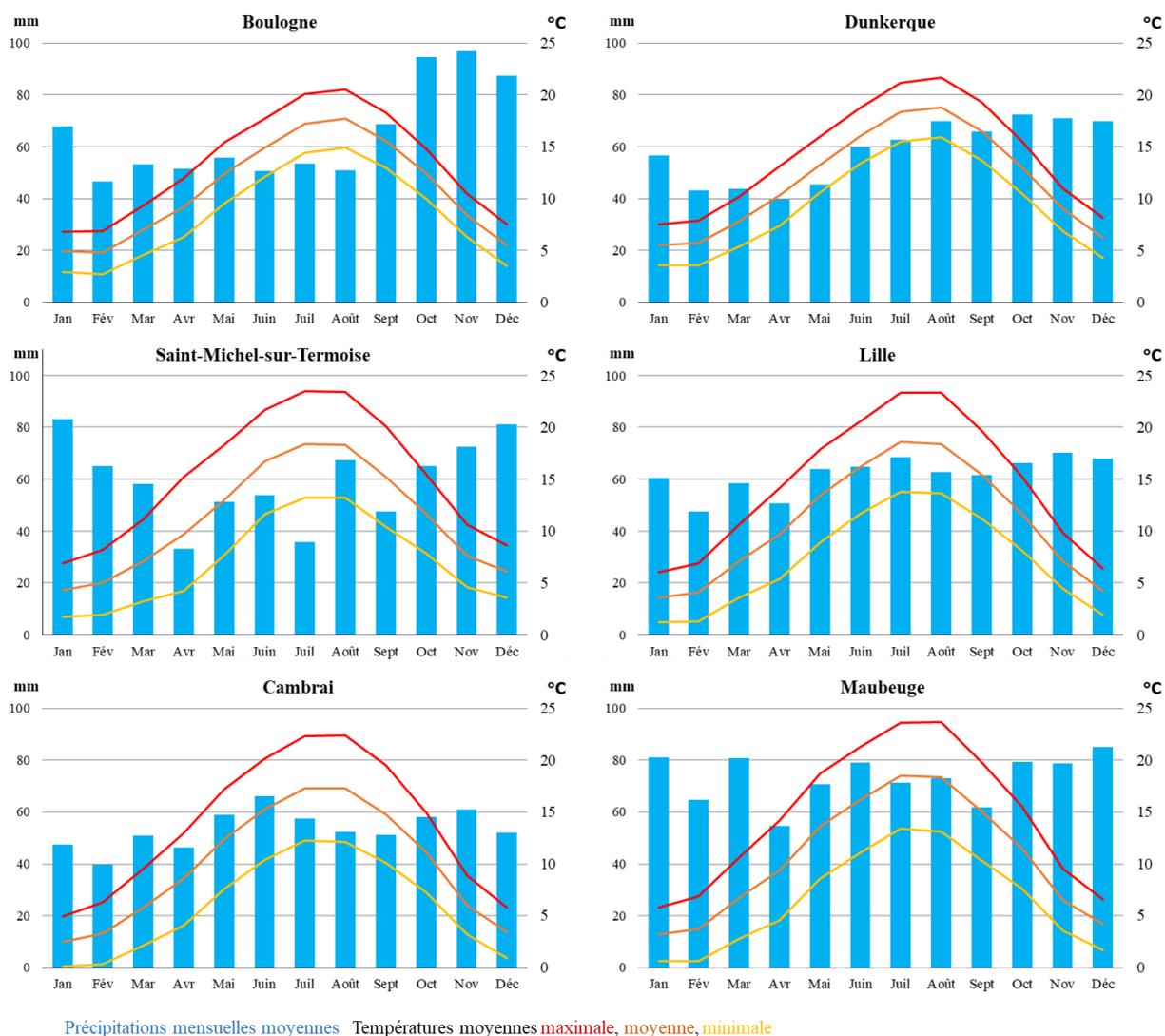


Figure 27 : Précipitation et températures de quelques stations en Nord-Pas de Calais

3. Contexte topographique

Le relief est peu prononcé dans son ensemble (Figure 28). Au nord, s'étendent les plaines des Flandres (localement sous le niveau de la mer) et de la Lys, puis des plateaux crayeux d'altitude modeste (60 à 120 m). A l'est, l'altitude augmente à l'approche de l'Avesnes et du massif ardennais (377 m au sud de Revin). La partie méridionale de la région est marquée par un relèvement qui court du Boulonnais aux Ardennes. Sa partie occidentale, selon un axe nord-ouest /sud-est, constitue les collines de l'Artois dont l'altitude décroît du Haut Boulonnais (211 m) jusqu'à Arras (70 m).

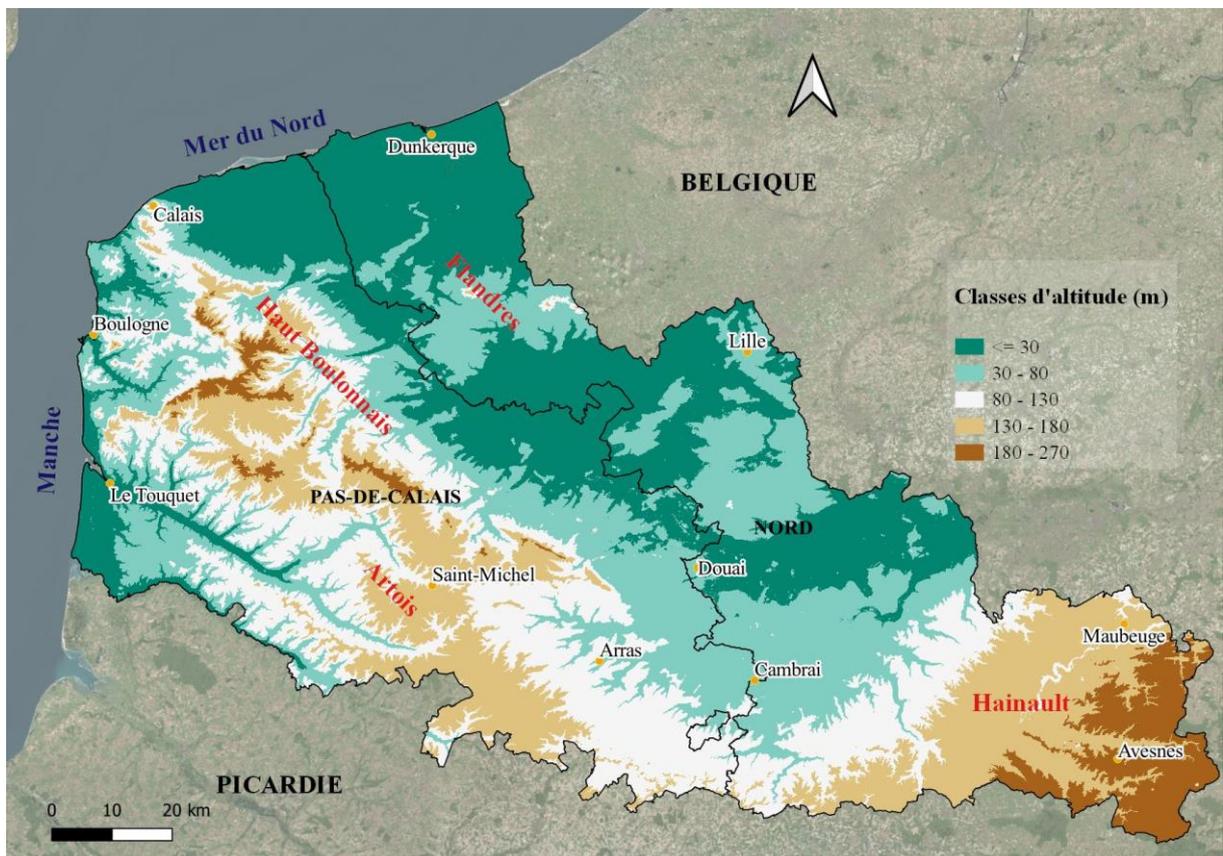


Figure 28 : Topographie du Nord-Pas-de-Calais

4. Contexte hydrographique

Le réseau hydrographique du nord de la France est constitué d'un dense maillage de rivières et de petits fleuves côtiers, caractérisés par de faibles gradients hydrauliques et de faibles débits. La somme des débits moyens interannuels de l'ensemble des cours d'eau du Nord-Pas de Calais est égale à $75 \text{ m}^3/\text{s}$. Le module le plus important est celui de la Lys à son entrée en Belgique, à Wervicq ($12,1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Par ailleurs, la région a une forte tradition d'aménagements hydrauliques : lutte contre les intrusions salées, assainissement des zones humides, évacuation des eaux de ruissellement, canaux de transport, moulins. Avec un cumul de 650 km de cours d'eau et canaux (Figure 29), elle a un réseau de voies navigables sans équivalent en France. Les faibles pentes ont incité l'homme à canaliser les cours d'eau et à tisser un réseau maillé de canaux entre les différents bassins.

Seuls l'Authie, la Canche, la Liane, la Slack et le Wimereux sont hydrauliquement indépendants. Des canaux de liaison permettent à l'eau de s'écouler d'un bassin à l'autre, et parfois même, grâce à des stations de pompages, d'inverser le sens d'écoulement d'un cours d'eau.

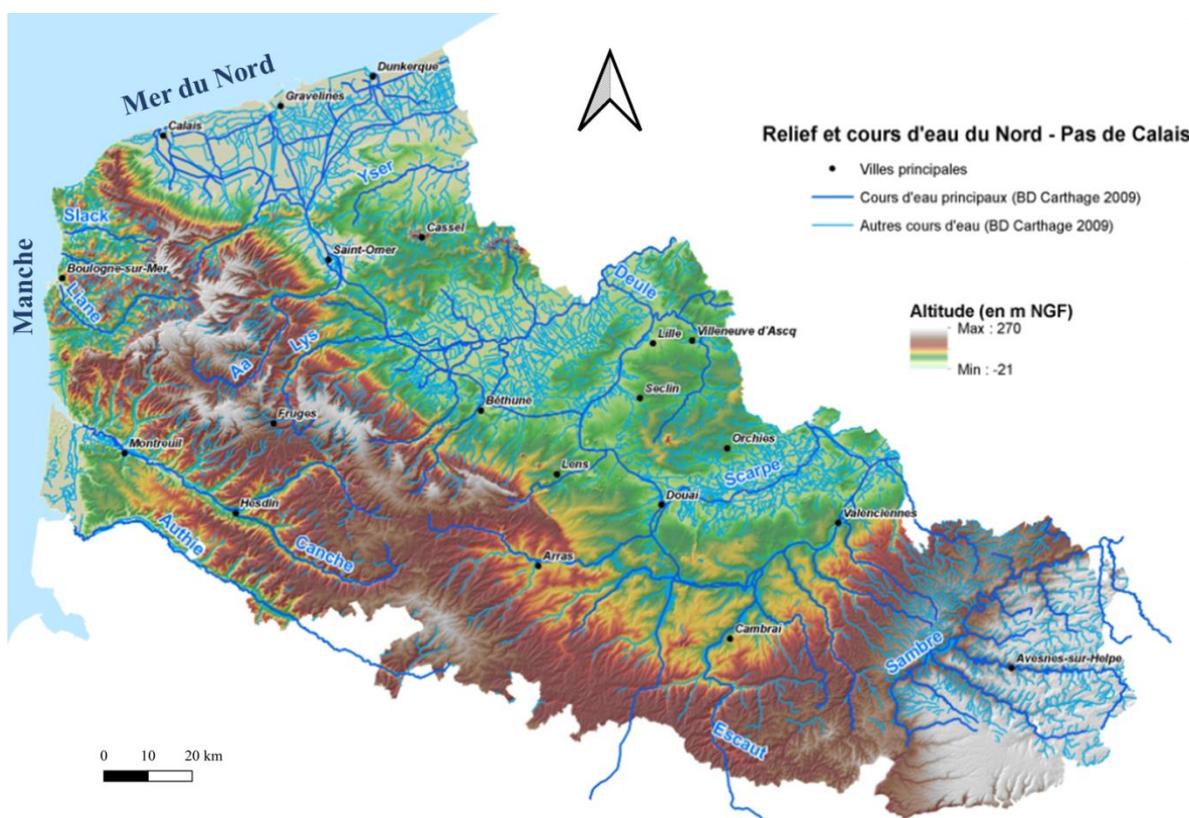


Figure 29 : Réseau hydrographique du Nord-Pas-de-Calais

5. Contexte géologique

Géologiquement, le Nord-Pas-de-Calais est à cheval sur deux grands bassins sédimentaires : au nord, le bassin de Bruxelles Londres ; au sud, le bassin de Paris. Les formations géologiques de la région sont donc exclusivement sédimentaires et peuvent être classées en deux groupes. Le premier groupe est constitué de roches d'origine marine, datant du Primaire au Tertiaire. Ce sont des roches dures comme les calcaires, les grès ou les schistes, ou des roches tendres telles que la craie et la craie marneuse. Des roches meubles telles que l'argile et le sable sont également représentées dans ce premier groupe. Le second groupe est celui des formations superficielles, constitué principalement de matériaux lœssiques, de dépôts sédimentaires marins et fluviaux et d'argile résiduelle à silex. Cette dernière est le produit de l'altération intense des formations crayeuses du Crétacé. Ce groupe compte aussi l'ensemble des produits de remaniement associant souvent des processus éoliens et colluviaux.

La figure suivante montre les différentes formations géologiques présentes dans la région du Nord-Pas-de-Calais.

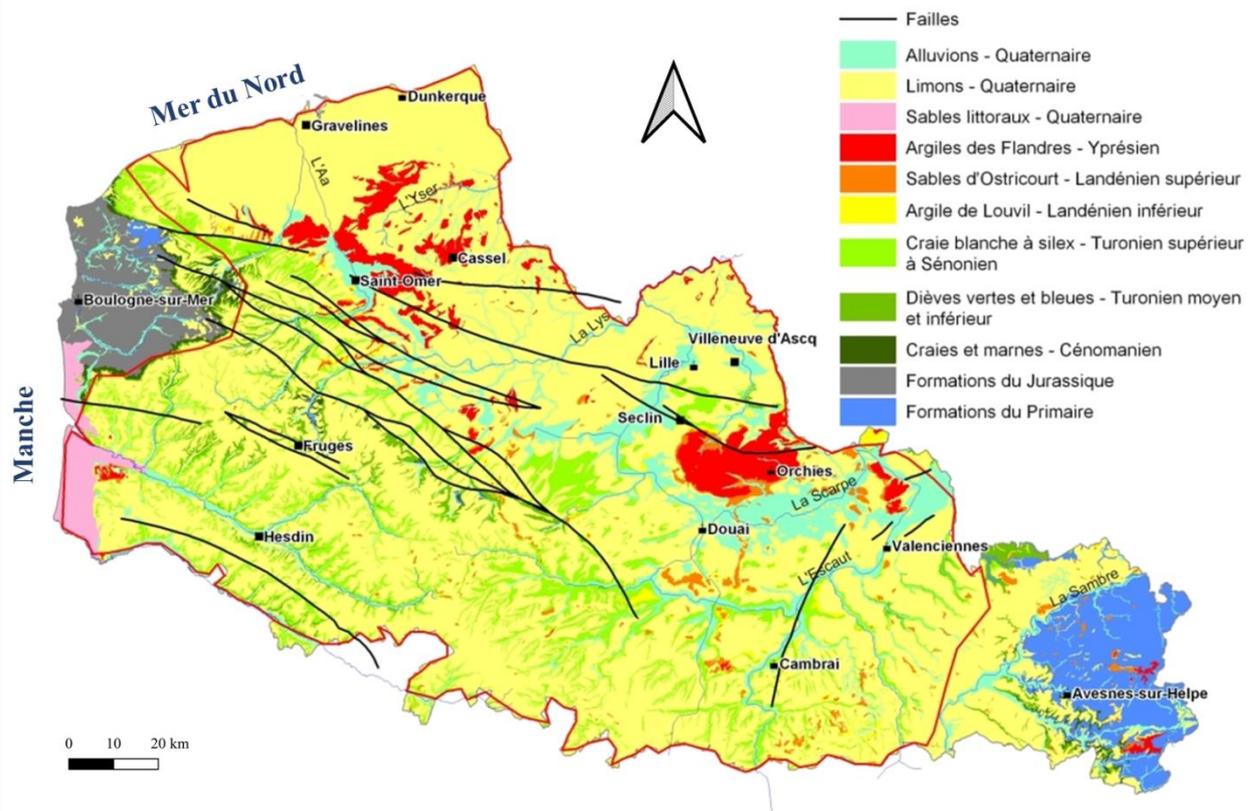


Figure 30 : Carte géologique du Nord-Pas-de-Calais

La Figure 31 présente deux coupes géologiques, explicitant l'organisation des faciès selon les orientations perpendiculaire (AB) et longitudinale (CD) à l'anticlinal de l'Artois.

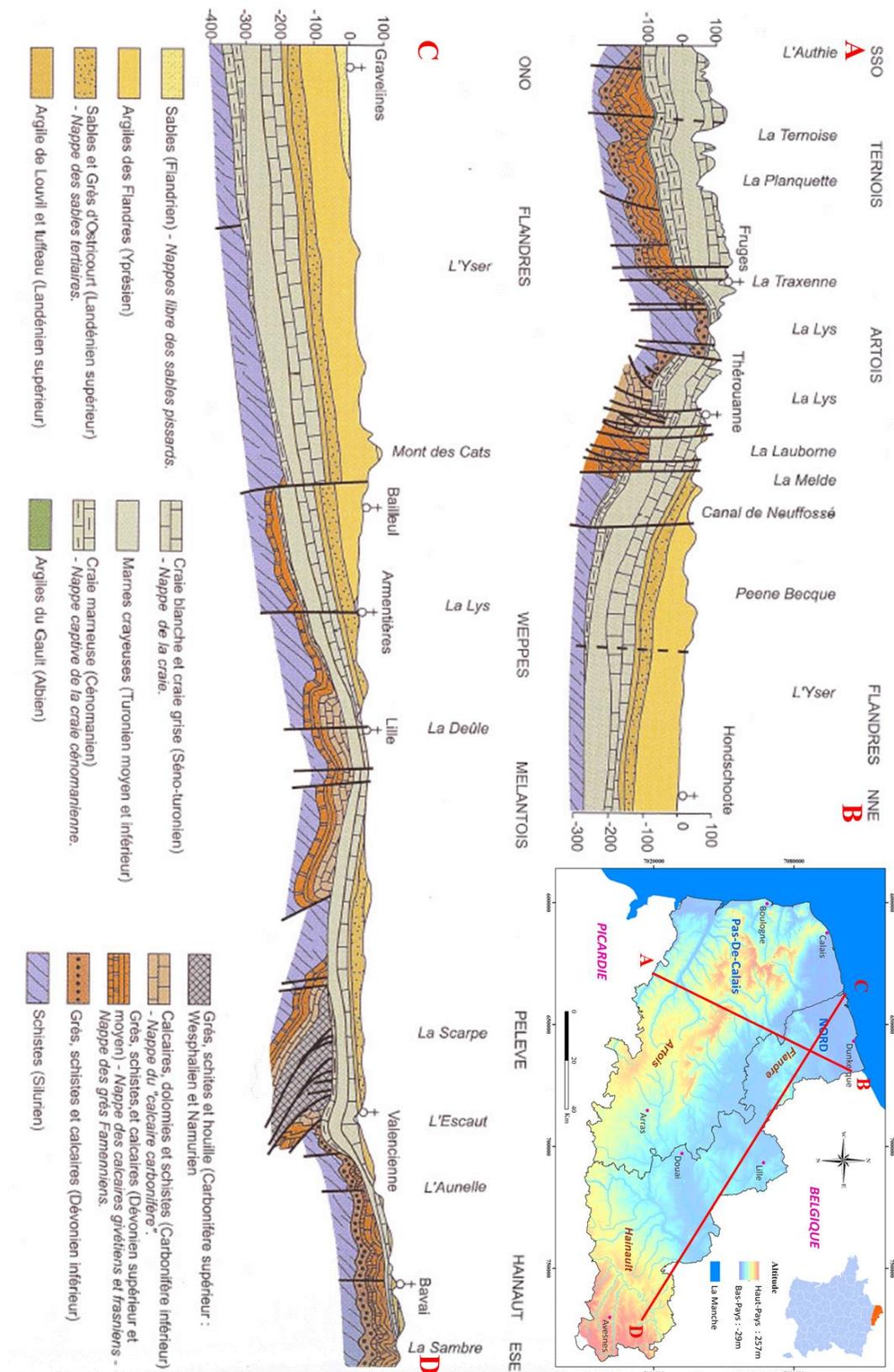


Figure 31 : Coupe géologique du Nord-Pas-de-Calais
source : Beckelynck & Kleszcz (1981) [106] (modifiée)

6. Contexte pédologique

D'un point de vue pédologique, les sols rencontrés sur le Nord-Pas-de-Calais sont à dominante limoneuse (Figure 32), d'origine éolienne, et parfois épais de plus de 10 m. Ils sont reconnus pour leur grande fertilité, notamment grâce à une importante réserve hydrique. Toutefois, du fait d'une forte sollicitation agricole, ils peuvent se trouver appauvris en matière organique et localement sensibles à l'érosion et à la battance. Ainsi, même avec des pentes faiblement marquées, les phénomènes d'érosion et de ruissellement peuvent être importants.

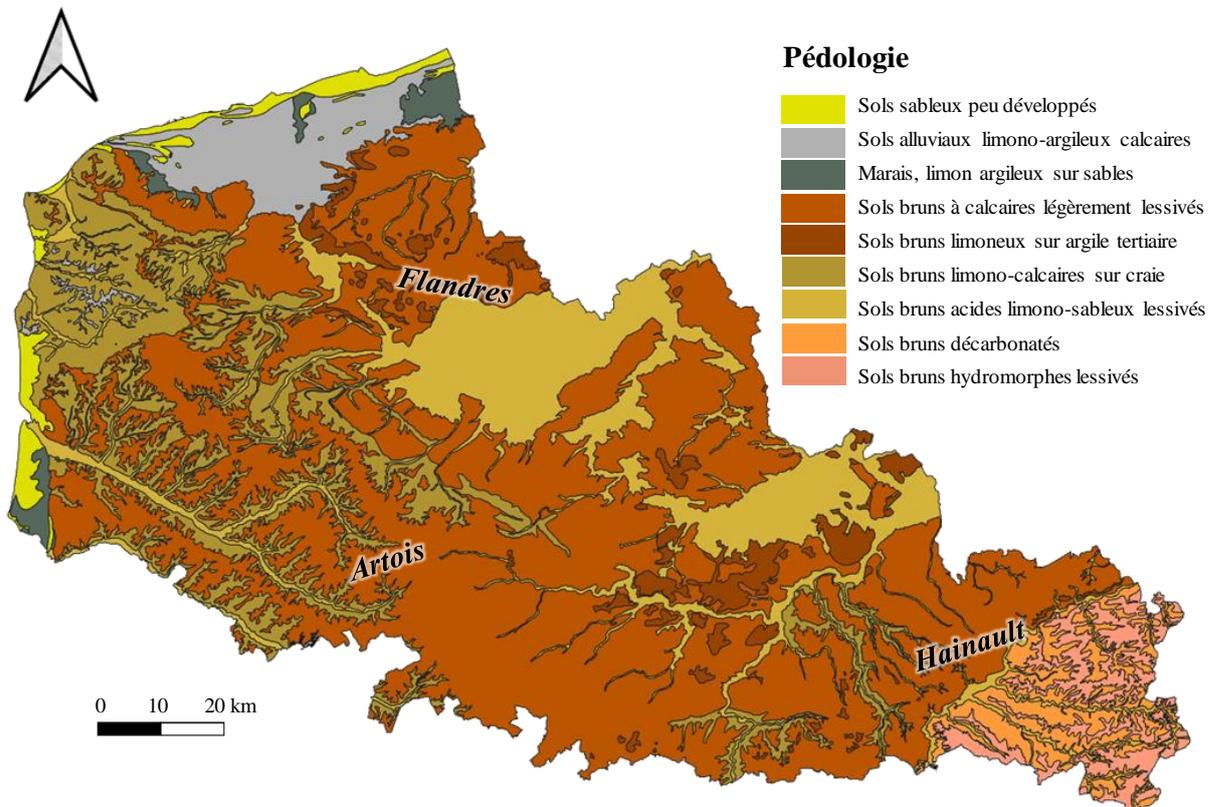


Figure 32 : Carte pédologique du Nord-Pas de Calais

La carte ci-dessus propose une carte synthétique des sols du Nord-Pas-de-Calais, basée sur le référentiel pédologique régional.

La famille des sols bruns comprend les sols jeunes avec des humus de type "Moder" qui ne se lie pas facilement aux argiles. Plus le sol brun est jeune, plus il sera vulnérable à l'érosion. En revanche, la famille des sols non exploités est la plus vulnérable à l'érosion, notamment les sols côtiers et les Moères qui occupent la partie nord de la zone d'étude et dont la forte teneur en sel (sodium) détériore la qualité et les rend vulnérables aux aléas de l'érosion [6].

7. Végétation et occupation des sols

Près de 70 % de la surface régionale est utilisée pour l'agriculture. Hormis dans le Bas Boulonnais et le Thiérache où les prairies occupent plus de 50 % de la superficie, les agro-systèmes sont de type polyculture dominés par les grandes cultures : céréales, betterave sucrière, et pomme de terre au premier plan. Cette utilisation intensive des terres est favorisée par une proportion importante de sols à bonne potentialité, des conditions climatiques favorables et un relief peu contraignant. La prairie permanente occupe environ 15 % de la surface régionale mais le taux de boisement, de l'ordre de 7 %, est particulièrement faible.

Malgré un réseau hydrographique très dense, la proportion de zones humides est réduite à sa portion congrue (1 % de la zone d'étude) du fait de la prédominance des aménagements hydrauliques (canalisation, assèchement des Moères), du drainage agricole et de l'urbanisation.

La cartographie de l'occupation des sols reproduite dans la Figure 33 est basée sur deux sources de données :

- CORINE LAND COVER 2018, la dernière version de l'inventaire biophysique européen de l'occupation des sols ;
- RPG 2019, le recensement parcellaire graphique, correspondant à la base de données contenant les déclarations des agriculteurs sur la mise en culture de leurs parcelles, obligatoire pour obtenir les financements de la politique agricole commune européenne.

L'analyse de cette dernière source de données permet d'affiner la connaissance de l'assolement dans la région. En particulier, le blé d'hiver représente la culture largement majoritaire, occupant environ 50 % de la surface agricole utile (SAU) de la région. Le maïs, la betterave et la pomme de terre représentent quant à eux respectivement 12, 10 et 10 % de la SAU.

De typologie intensive et productiviste, l'agriculture du Nord-Pas-de-Calais intègre peu de techniques de conservation des sols (semis sous couvert, non labour, culture d'intersaison). Les traditions bocagères et pastorales du Haut-Artois, du Boulonnais et du Thiérache, sont elles-mêmes soumises à des pressions (retournement de prairies, remembrement parcellaire) au profit de cultures plus rentables et de parcelles plus grandes pour les accueillir.

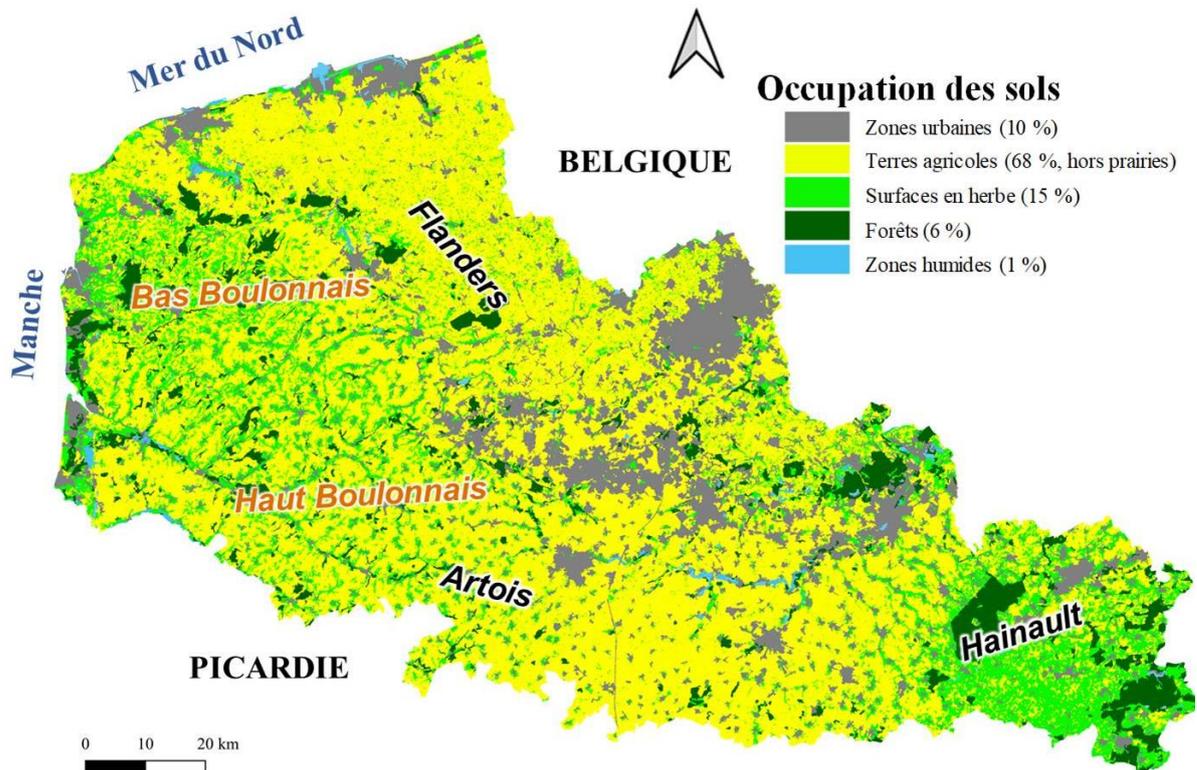


Figure 33 : Occupation des sols en Nord-Pas-de-Calais

Toutefois, grâce à son cycle décalé (récolte précoce) la culture du blé d'hiver est déjà souvent associée à une culture dérobée (culture d'intersaison, généralement fourragère) d'intérêt à la fois économique et agronomique (piège à nitrates, protection des sols). Dans la région, c'est le cas pour 40 % des surfaces dédiées aux céréales d'hiver, contre à peine 1 % pour les autres cultures industrielles (pomme de terre, betterave).

Chapitre 3 : Méthodologie et données

1. Equation universelle des pertes en sol révisée RUSLE

Le modèle empirique RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) de Renard et al. (1997) [101] est un développement du modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) de Wischmeier & Smith (1978) [41], initialement prévu pour l'estimation de l'érosion hydrique à l'échelle de parcelle agricole. Cette révision a étendu le champ d'application des calculs à des bassins versants étendus, comprenant différents types d'occupation des sols. L'approche spatialisée de RUSLE est mise à contribution dans nombreuse études pour quantifier les pertes annuelles moyennes en sol causées par l'érosion hydrique, y compris dans des contextes méditerranéens ou semi-arides [107] [108] [109]. En accord avec la programmation de lutte contre l'érosion du Royaume, le modèle est également privilégié pour les études concernant le Maroc [110] [111] [112].

L'équation intègre cinq facteurs représentant chacun une caractéristique physique affectant la quantité potentielle de sol érodé : l'énergie cinétique des pluies, l'érodibilité du sol, la topographie, le couvert végétal et les pratiques antiérosive.

$$A = R \times K \times C \times LS \times P \qquad \text{équation 1}$$

A : Perte en terre (t.ha⁻¹.an⁻¹)

R : Agressivité climatique (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹)

K : Erodibilité des sols (t.hr.Mj⁻¹.mm⁻¹)

LS : Facteur topographique (relief)

C : Couvert végétal (occupation du sol)

P : Pratiques d'aménagement

En revanche, le modèle RUSLE simule uniquement les pertes en terre qui résultent de l'érosion en nappe et en rigoles, à l'exclusion des autres formes d'érosion (ravinement, sapelement de berge, badlands).

2. Erosivité des pluies (facteur R)

Les précipitations constituent le vecteur principal de l'érosion hydrique. Selon la formule de Wischmeier & Smith (1978) [41], l'érosivité des pluies nécessite l'estimation de l'énergie cinétique (E_c) et l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque averse (équation 3).

Le second paramètre étant rarement disponible, il est souvent impossible de calculer le facteur R selon la méthode décrite dans RUSLE. Dans cette optique, l'équation 4 (Arnoldus, 1980) [113] propose une méthode de substitution fondée sur les quantités de pluie annuelles et mensuelles.

$$R = EC \times I_{30} \quad \text{équation 3}$$

R : indice d'agressivité des pluies ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$)
 E_c : Energie cinétique (MJ)
 I_{30} : Intensité des pluies ($\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$)

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5 \times \log\left(\frac{P_i^2}{P}\right) - 0.8188} \quad \text{équation 4}$$

R : indice d'agressivité des pluies ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$)
 P_i : Pluie moyenne mensuelle (mm)
P : Pluie moyenne annuelle (mm)

Pour la partie marocaine, en l'absence de données sur l'énergie cinétique des pluies, la méthode de substitution est retenue. Les données des stations pluviométriques réparties sur le bassin versant de l'oued El Abid (Figure 10) sont obtenues auprès de l'agence du bassin hydraulique d'Oum Er Rbia. Les données courent sur une période d'observation de 34 ans (1983-2017). Elles ont permis de faire l'analyse climatique ainsi que de calculer l'érosivité des pluies à l'échelle de la zone d'étude.

Pour le Nord-Pas-de-Calais, des données d'érosivité de pluies sont produites par le Centre européen de données sur les sols (ESDAC), à une résolution de 500 m, basé sur 1675 stations de précipitations et 26 394 années cumulées de mesures [114]. Ces données sont calculées selon l'équation 3, avec une résolution temporelle fine et agrégées au pas de temps mensuel, permettant ainsi des analyses plus fines de l'érosion.

3. Erodibilité des sols (facteur K)

L'érodibilité des sols est une mesure de la vulnérabilité des particules au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement. La texture est le principal facteur qui influence le facteur K, mais la structure, la teneur en matière organique ainsi que la perméabilité du sol jouent aussi un rôle [115].

Ainsi, la formule proposée par Wischmeier & Smith (1978) [41] prend en compte la texture des sols, leur teneur en matière organique ainsi que leur structure suivant l'équation suivante :

$$K = \frac{2.1 \times 10^{-4} \times M^{1.14}(12 - a) + 3.25 \times (b - 2) + 2.5 \times (c - 3)}{100} \quad \text{équation 5}$$

K : Érodibilité des sols (t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹)

b : structure du sol

M : facteur de texture du sol (% limons+% sable)(100-%Argiles)

a : teneur en matière organique (%)

c : perméabilité

La spatialisation du facteur K nécessite une base de données distribuée des paramètres mentionnés ci-dessus. Une telle base de données n'existant pas pour le bassin versant de l'oued El Abid. Néanmoins la carte géologique à l'échelle 1/ 100 000 a permis la détermination de l'érodibilité des sols en se basant sur l'analyse de la friabilité de la roche mère des différentes formations géologiques de la zone d'étude. Cette carte a été utilisée comme support de vectorisation sous SIG, puis les classes ayant une dureté comparable ont été regroupées. Le résultat est une couche d'information en mode vecteur, convertie en mode raster. Une valeur d'érodibilité a été affectée pour chaque ensemble de roches (cf. Partie 3).

Pour le Nord-Pas-de-Calais, L'ESDAC fournit également une grille interpolée de l'érodibilité des sols à l'échelle européenne, avec une résolution de 500 m et une correction tenant compte de la présence de pierres en surface. Cette carte est basée sur une étude pédologique de 2009 concaténant 20 000 points d'échantillonnage (analysés en termes de teneur en matière organique, de texture du sol, de structure du sol et de perméabilité) à l'échelle de l'Europe [116]. Ces données ont été comparées aux références locales préalablement établies [117] [118].

4. Topographie (facteur LS)

Le facteur topographique représente l'effet combiné de l'inclinaison de la pente et sa longueur. L'inclinaison agit sur la capacité des eaux ruisselantes à détacher et à transporter les particules du sol. Plus la pente est raide, plus le ruissellement acquiert de l'énergie cinétique et érode le sol. Et plus la pente est longue, plus les pertes de sol sont importantes. De plus, une longue pente permet davantage la concentration des filets de ruissellement (concentration des flux) augmentant de fait le potentiel érosif.

Pour le bassin versant de l'oued El Abid, la formule proposée par Mitasova et al. (1996) [119] est retenue pour calculer le facteur topographique à partir de la carte d'accumulation de flux et de la carte des pentes (en degrés) tous les deux dérivés d'un modèle numérique du terrain (MNT).

$$LS = \left(\frac{\text{flow acc} \times RS}{22.13} \right)^{0.4} \times \left(\frac{\sin(S \times 0.01745)}{0.0896} \right)^{1.4} \quad \text{équation 6}$$

LS : facteur de pente (-)
S : pente (°)

RS : résolution du MNT (30 m)
flow acc : accumulation des flux

Le MNT utilisé dans la présente étude appartient au programme Aster (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer") coproduit par le MIT et la NASA. Il a une résolution de 30 mètres.

Le jeu de données de facteurs topographiques de l'ESDAC [120] utilise un algorithme de flux multiples et des règles spécifiques pour les pentes complexes, définies par Desmets & Govers (1996) [121]. Il est fourni dans une grille de données à haute résolution (25 m).

5. Occupation de sol (facteur C)

Le facteur d'occupation du sol est un simple rapport entre l'érosion sur un sol nu et l'érosion observée sous un couvert végétal. Il constitue le principal facteur protecteur sur lequel il est possible d'intervenir pour réduire les risques d'érosion.

En effet, la couverture végétale protège le sol en interceptant les gouttes de pluie, grâce aux parties aériennes des plantes, ce qui permet la dissipation de l'énergie cinétique et ainsi la diminution de l'effet splash [122]. Elle contribue également à ralentir la formation des croûtes de battance, et plus encore à prévenir la formation d'une croûte sédimentaire, le type le plus avancé de dégradation des sols agricoles. Ainsi, une capacité d'infiltration élevée est maintenue, limitant le risque de genèse d'un ruissellement même lors des fortes pluies [123]. Même lorsque le ruissellement est initié, tiges et feuilles forment un écran contre le cheminement des filets d'eau.

La couverture végétale permet aussi de maintenir les sols grâce aux systèmes racinaires et racinaires. Les plantes améliorent la cohésion des sols et renforcent ainsi leurs propriétés mécaniques [124].

5.1. Bassin versant de l'oued El Abid

Pour la zone marocaine, le facteur C a été évalué par traitement d'images satellitaires : Sentinel-2 (MSI), une série de satellites d'observation de la Terre gérés par l'Agence Spatiale Européenne dans le cadre du programme Copernicus.

Les images de Sentinel-2 sont composées de 13 bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge (Tableau 4). La TCI est une image RVB construite à partir des bandes B02 (bleue), B03 (verte) et B04 (rouge). Les radiances déterminées à partir des différentes bandes sont codées entre 1 et 255, 0 étant réservé à 'Pas de données'.

Tableau 4 : Les bandes spectrales Sentinel 2

Numéro de bande	Largeur de bande (nm)	Longueur d'onde centrale (nm)	Résolution (m)
Bande 1 : Aérosol côtier	20	443	60
Bande 2 : Bleu	65	490	10
Bande 3 : Vert	35	560	10
Bande 4 : Rouge	30	665	10
Bande 5: Végétation "Red Edge"	15	705	20
Bande 6: Végétation "Red Edge"	15	740	20
Bande 7: Végétation "Red Edge"	20	783	20
Bande 8A : Végétation "Red Edge"	115	842	10
Bande 8: NIR	20	865	20
Bande 9 : Vapeur d'eau	20	945	60
Bande 10 : SWIR - Cirrus	30	1375	60
Bande 11 : SWIR	90	1610	20
Bande 12 : SWIR	180	2190	20

Les images utilisées dans la présente étude sont acquises le 27 juillet 2021. Les images satellitaires avec une résolution de 10 m ont été corrigées des anomalies atmosphériques. En effet, les luminances enregistrées par le capteur satellitaire correspondent à un signal complexe issu de la contribution de la surface terrestre et de l'atmosphère. La diffusion peut atténuer une partie de l'énergie illuminant la terre et l'atmosphère réduisant ainsi la force du signal se propageant de la cible au capteur.

Trois bandes spectrales sont destinées aux corrections atmosphériques avec une résolution de 60 m. Ces bandes correspondent à la bande d'aérosol, la vapeur d'eau et la Cirrus.

Les valeurs du facteur C dépendent de la nature et le pourcentage du couvert végétal. Ainsi, l'indice de végétation normalisé NDVI permet d'estimer et de différencier les différentes occupations de sol. Le NDVI est calculé à partir de la combinaison de bandes spectrales suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad \text{équation 7}$$

NDVI : normalized difference vegetation index

NIR : bande spectrale de l'infrarouge

R : bande spectrale du rouge

Une fois différenciées en fonction des valeurs de NDVI, les différentes occupations du sol sont associées à une valeur de facteur C en se basant sur la classification de Wischmeier & Smith (1978) [41].

5.2. Région Nord-Pas-de-Calais

Pour le Nord-Pas-de-Calais, la réalisation de la carte d'occupation des sols est fondée sur deux sources de données :

- CORINE LAND COVER 2018, la dernière version de l'inventaire biophysique européen de l'occupation des sols.
- RPG 2019, la base de données contenant les déclarations des agriculteurs sur la mise en culture de leurs parcelles, obligatoires pour obtenir les financements de la politique agricole commune européenne.

Ces données sont disponibles sous un format SIG numérisé, permettant une caractérisation spatiale très précise. Les parcelles agricoles ont été associées à une valeur de facteur C différent selon le type de culture, la saison et leur niveau de croissance correspondant [125].

6. Pratiques antiérosives (facteur P)

Les pratiques antiérosives sont intégrées à RUSLE comme facteur correctif décrivant les techniques de culture de conservation des sols. En effet, ces pratiques culturales réduisent la quantité et la vitesse du ruissellement et donc le potentiel érosif. Les pratiques de conservation les plus couramment utilisées sont le travail du sol contre-pente, le labour et le billonnage en courbe de niveau ainsi que la culture en bandes [126]. Le facteur est classé de manière semi-quantitative entre les valeurs de 1 en cas d'absence d'aménagement à 0,1 pour la pratique du billonnage cloisonné sur une pente faible [127] [128] [129].

7. Synthèse de la méthode

L'intégration et le traitement des données dans le SIG aboutit à une cartographie des différents facteurs du modèle, dont la combinaison produit les cartes d'estimation des pertes en sols. Les organigrammes synthétisant la méthodologie sont reportés en Figure 34 pour l'oued El Abid et en Figure 35 pour le Nord-Pas-de-Calais.

Bassin versant Oued El Abid

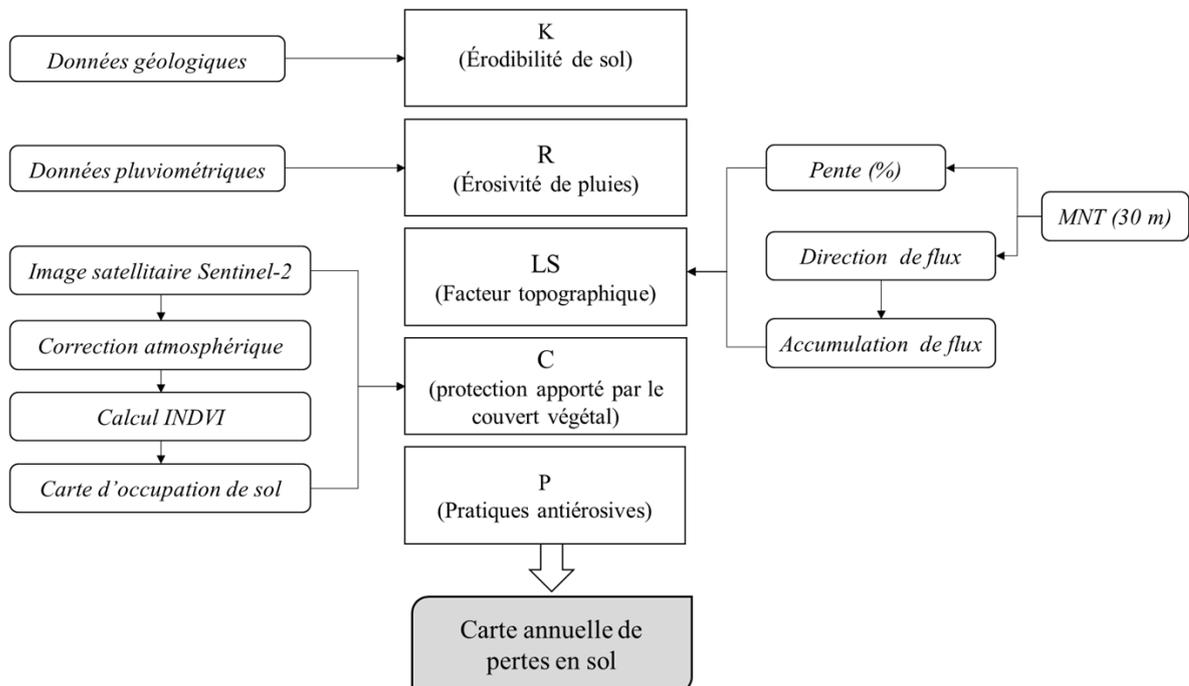


Figure 34 : Organigramme de la méthodologie appliquée au bassin versant de l'oued El Abid

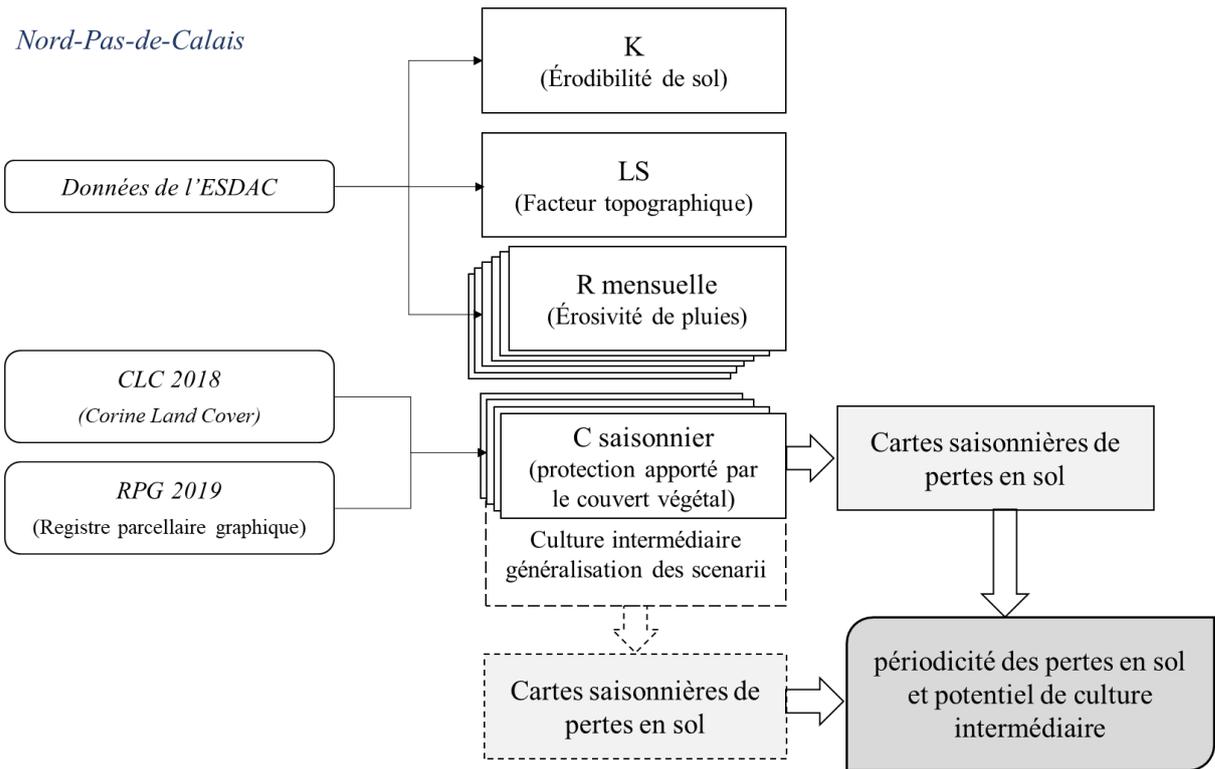


Figure 35 : Organigramme de la méthodologie appliquée au Nord-Pas-de-Calais

Partie 3 :

Résultats et interprétations

Chapitre 1 : Erosion du bassin versant de l'oued El Abid

Abid

1. Résultats des facteurs

1.1. Érosivité des pluies

L'agressivité des pluies a été calculée pour 11 stations météorologiques réparties sur la zone d'étude (Figure 36) avec une période d'observation de 34 ans (1983–2017).

L'interpolation des valeurs d'érosivité de pluies en utilisant la méthode déterministe (B-spline) a permis de spatialiser le facteur R en une donnée continue sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette interpolation a produit la carte d'érosivité des pluies suivante (Figure 36).

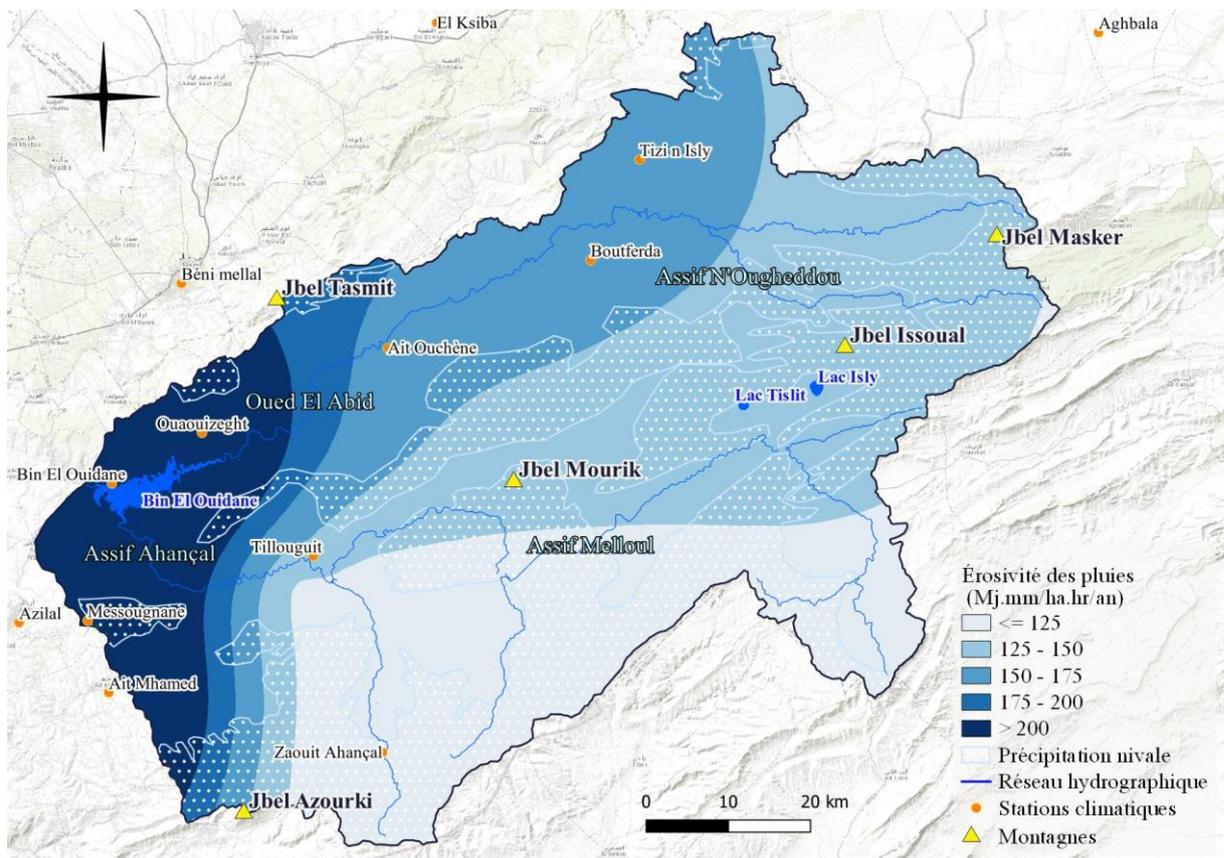


Figure 36 : Érosivité des pluies sur la zone d'étude

Les valeurs de l'érosivité des pluies sont comprises entre 73 et 277 $\text{Mj.mm.ha}^{-1}.\text{hr}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Les valeurs les plus élevées sont situées à l'aval du bassin versant. En montant en altitude, ces valeurs décroissent graduellement jusqu'à atteindre les valeurs les plus basses au niveau des

hauts sommets. Cette distribution spatiale suit, d'une part, un gradient pluviométrique déterminé par la continentalité et, d'autre part, un gradient altitudinale nord-ouest sud-est.

Dans les hautes montagnes, les précipitations nivales peuvent ne pas être négligeables pour le calcul du facteur R. Les chutes de neige, dans les zones en altitude, peuvent durer entre 10 et 120 jours par an. Or, ce type de précipitation ne porte pas une énergie érosive au même titre que la pluie : la neige tombe sous forme de cristaux qui flottent longuement dans l'air avant d'atteindre doucement le sol sans porter atteinte à sa structure superficielle. Afin d'intégrer cet aspect dans le calcul, une correction a été apportée aux résultats de spatialisation du facteur R : dans les zones concernées (Jbel Azourki, Jbel Mourik, Jbel Issoual, Jbel Masker...), le facteur d'érosivité des pluies a été corrigé à raison d'un retranchement du tiers de sa valeur (considérant des chutes de neige sur 4 mois en moyenne).

Par ailleurs, le phénomène de fonte produit aussi une énergie cinétique via le ruissellement qu'il occasionne. Cependant, en l'absence de données sur la dynamique et l'ampleur de ce phénomène, il n'est pas intégré dans le présent travail.

1.2. Érodibilité des sols

Etant donné le manque d'informations sur les données pédologiques du bassin versant de l'oued El Abid, la détermination de l'érodibilité des sols a été réalisée en se basant sur l'analyse de la friabilité de la roche mère des différentes formations géologiques de la zone d'étude (Figure 37).

Une valeur d'érodibilité a été affectée pour chaque ensemble de roches ayant une dureté comparable (Tableau 5).

Tableau 5 : Valeurs de l'indice d'érodibilité des formations

Classe de dureté	Erodibilité K (t.ha.hr)/(ha.Mj.mm)	Références
Calcaires massif	0.007	[130]
Calcaires, dolomites et grès compacts	0.008	[131]
Grès calcaires et marnes	0.033	[132]
Argiles roses et affleurements magmatiques	0.035	[132]
Marnes et marnes calcaires	0.042	[132]
Alluvions, terrasses	0.045	[132]
Argiles de décalcification, limons	0.053	[130]

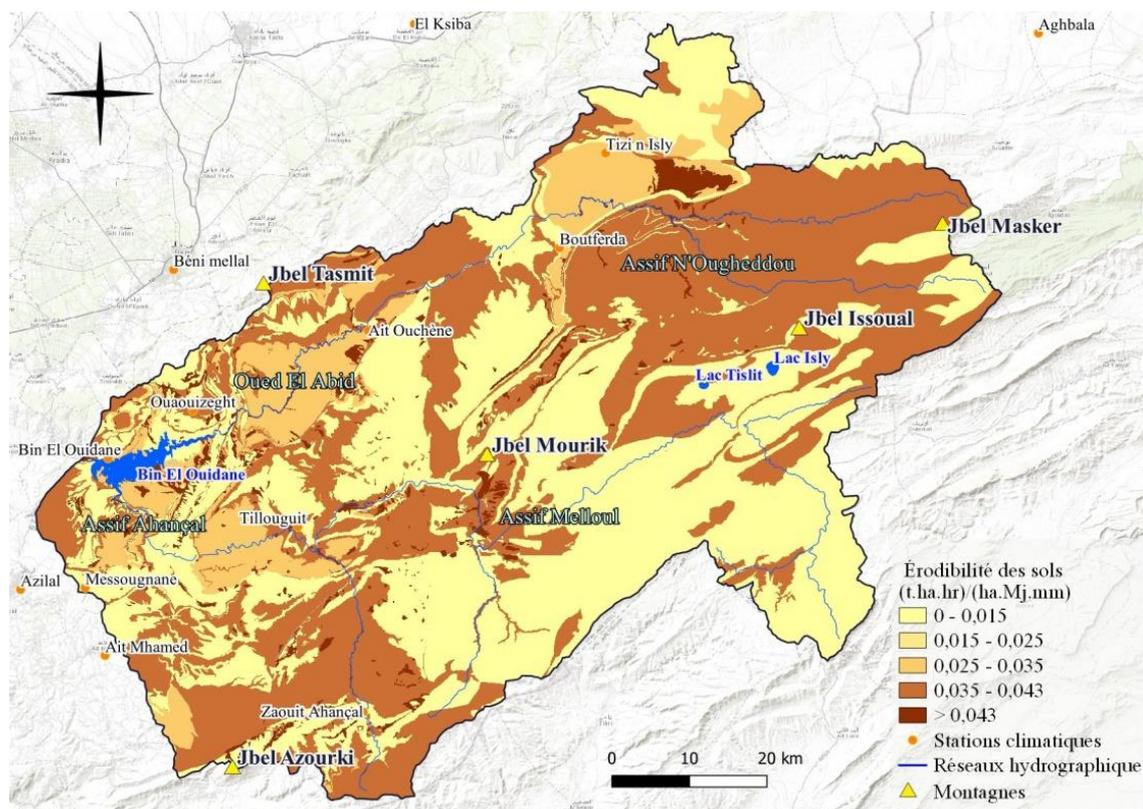


Figure 37 : Carte d'érodibilité des sols du bassin versant de l'oued El Abid

La majorité des sols dans le bassin versant sont peu évolués et issus d'une roche mère de type calcaire, marneuse et argileuse. Les marnes sont caractérisées par une altération mécanique rapide, résultant d'une hydratation des argiles gonflantes, aboutissant à la formation d'une masse meuble d'argile carbonatée. Etant donné que leur teneur en calcaire varie globalement de 15 à 30% [133], la capacité d'échange est souvent amoindrie, impliquant une stabilité structurale faible. Ces faciès, caractéristiques des zones montagneuses à forte pente dans le site d'étude, sont donc plus érodibles avec des valeurs supérieures à $0,035 \text{ t.hr.Mj}^{-1}.\text{mm}^{-1}$.

Les sols classés dans la catégorie moyennement à faiblement érodibles sont surtout des sols peu évolués sur des roches cohérentes (calcaires, dolomies) qui se caractérisent par une faible susceptibilité à l'érosion. Ces faciès sont caractéristiques des plateaux de la zone d'étude et de sa zone sud-sud-est, avec des valeurs d'érodibilité inférieures à $0,035 \text{ t.hr.Mj}^{-1}.\text{mm}^{-1}$.

Au regard des caractéristiques des sols de la région, le processus de dégradation des terres subit une boucle de rétroaction négative. En effet, les sols carbonatés, perdant de leur fraction argileuse au fur et à mesure du processus, deviennent d'autant plus sensible à l'érosion hydrique. Ainsi, on observe souvent l'aggravation de l'érosion, initialement en nappe, en des ravinelements spectaculaires.

De plus, certains phénomènes mécaniques créent une hétérogénéité temporelle de l'érodibilité des sols : cycle journalier des températures, gel et dégel saisonnier, variation de la teneur en eau des sols. Cependant, la résolution des données disponibles et la structure même du modèle RUSLE ne permettent pas ce niveau de raffinement dans la modélisation.

1.3. Occupation du sol

La densité des essences forestières est variable au niveau du bassin versant de l'oued El Abid. Leur répartition est influencée par l'altitude, l'exposition des versants, l'anthropisation et les conditions édaphiques. A cet égard, le site d'étude abrite aussi bien des peuplements denses que des peuplements moyennement denses ou des peuplements très clairsemés. Or, plus le couvert végétal est dense, meilleure est la protection du sol vis-à-vis de l'agressivité des pluies et du ruissellement.

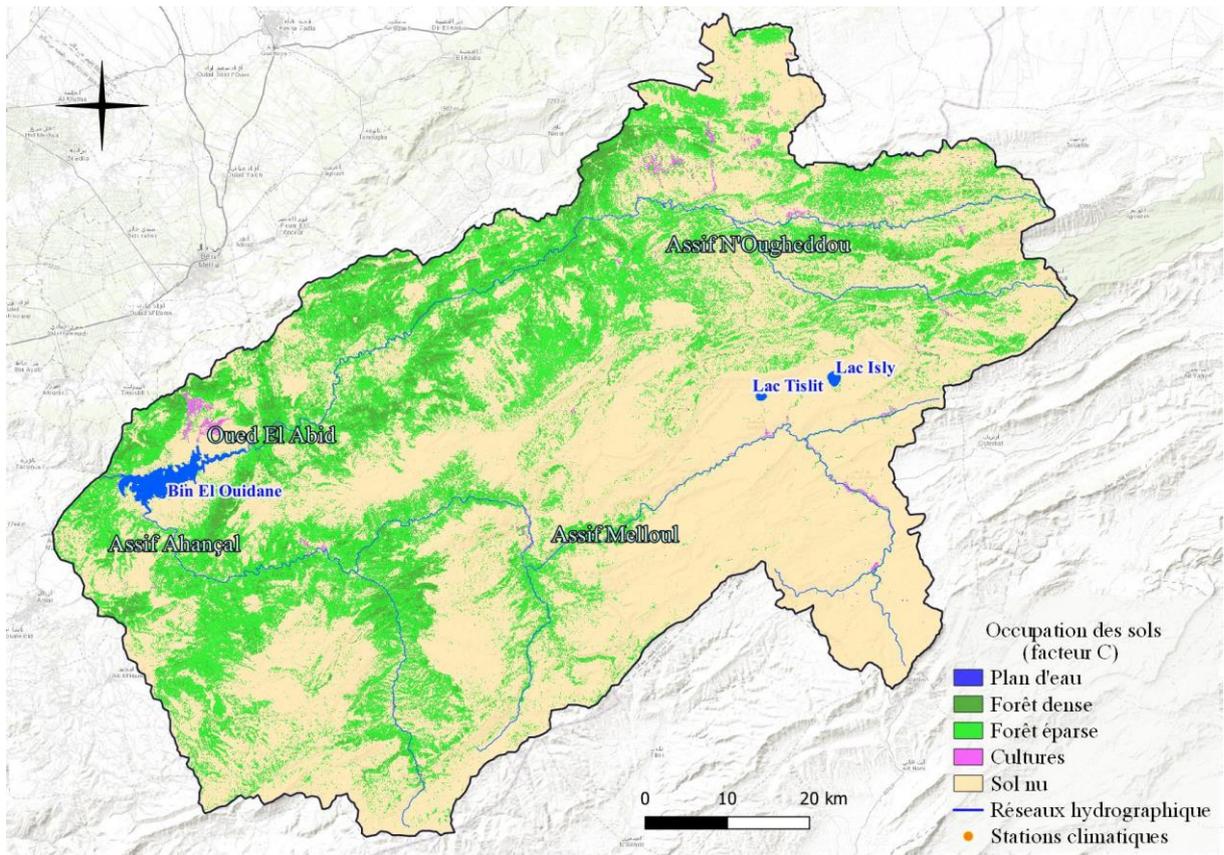


Figure 38 : Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'oued El Abid

Les facteurs C associés aux différents types d'occupation des sols sont reportés ici :

Tableau 6 : Valeurs de l'indice d'occupation de sol

Classe d'occupation de sol	Valeur du facteur C
Cultures	0.5
Forêt dense	0.05
Forêt éparse	0.1
Sol nu	1
Eau	0

L'aval du bassin versant est plus couvert que son amont, la majorité des peuplements forestiers étant installés dans les talwegs et le long des cours d'eau. Les essences principales sont le thuya de Berbérie, le genévrier, le pin d'Alep, le cèdre de l'Atlas et le chêne vert. La réparti-

tion de la végétation naturelle dépend grandement de l'orientation des versants (ensoleillement).

L'activité agricole reste très modeste sur la zone d'étude, elle est limitée à l'arboriculture fruitière à base d'olivier, en plus de cultures maraichères et fourragères installées le long de quelques petits tronçons de cours d'eau (Photo 21).



Photo 21 : Culture maraichère au long d'un tronçon de cours d'eau

La partie amont du bassin versant est généralement dépourvue de tout couvert forestier. 46% des terrains de la zone d'étude sont presque désertiques, du fait d'altitudes très élevées (supérieures à 2600 m), et d'un climat caractérisé par des températures très basses associées à des précipitations nivales. A partir de 3500 m d'altitude, la couverture neigeuse peut se maintenir plusieurs semaines en année normale (Photo 22). Ainsi, ces zones réputées nues au regard de la végétation, profitent d'une protection des sols par le couvert neigeux. Au même titre que le facteur d'érosivité des pluies, le facteur C est corrigé dans les zones concernées, en considérant une valeur nulle (couvert neigeux intégral) sur 4 mois en moyenne.



Photo 22 : Couverture neigeuse dans les hautes montagnes (fin du printemps)

1.4. Topographie

Le facteur topographique LS représente l'influence de la pente dans le processus d'érosion, par la combinaison de sa raideur et de sa longueur. La Figure 39 cartographie la répartition spatiale de ce facteur dans la zone d'étude.

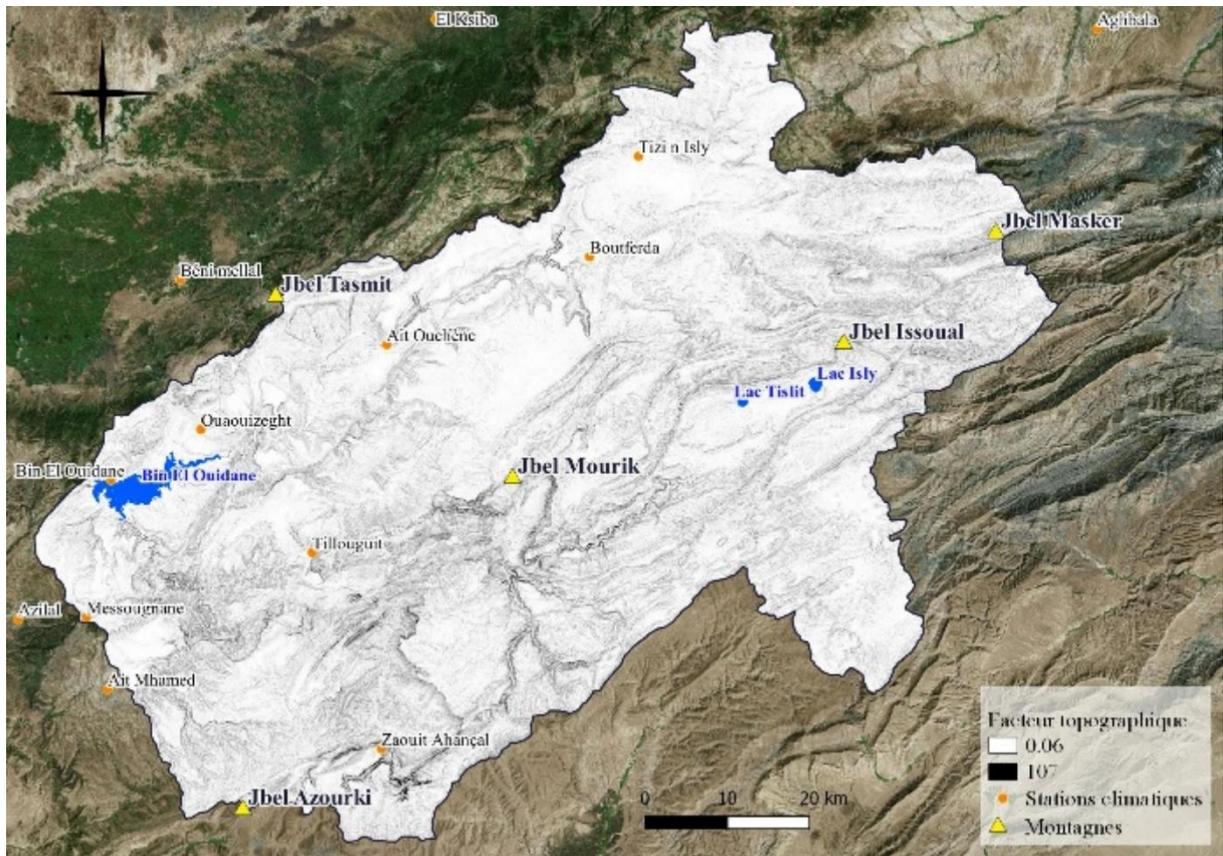


Figure 39 : Carte du facteur LS du bassin versant de l'oued El Abid

Les valeurs du facteur topographique varient entre 0.06 (zone plate) et 107 (pente très raide). Les valeurs les plus élevées s'observent au niveau des flancs des talwegs, caractérisés par les fortes pentes creusées par les cours d'eau au cours de l'histoire géologique de la région. Des facteurs LS élevés se retrouvent également au niveau des crêtes des massifs montagneux. Ainsi, cette classe de facteurs topographiques est associée aux pentes fortes qui représentent près de 37% de la superficie totale du bassin versant de l'oued El Abid, avec des inclinaisons allant de 20° jusqu'à 75°. Ces zones sont de fait très vulnérable au phénomène de ruissellement. Or, celui-ci génère une énergie mécanique croissante, provoquant ainsi l'arrachement des particules des sols au fur et à mesure de l'accumulation des eaux le long des pentes, en particulier pour les plus marquées.

Les valeurs faibles correspondent aux plateaux (le plateau d'El Houanet, plateau des lacs, plateau d'Ait Abdi et le plateau d'Ait Mhamed), et aux dépressions et cuvettes (cuvette de Ouauozert, Tizi n'Isly et synclinal de Tagleft). Les pentes dans ces zones sont comprises entre 0° et 20° et représentent 63% de la superficie totale du bassin versant.

1.5. Pratiques antiérosives

Très peu d'informations sont disponibles quant aux pratiques érosives dans la région d'étude. Les zones où des actions de lutte ont été identifiées sont représentées sur la Figure 40.

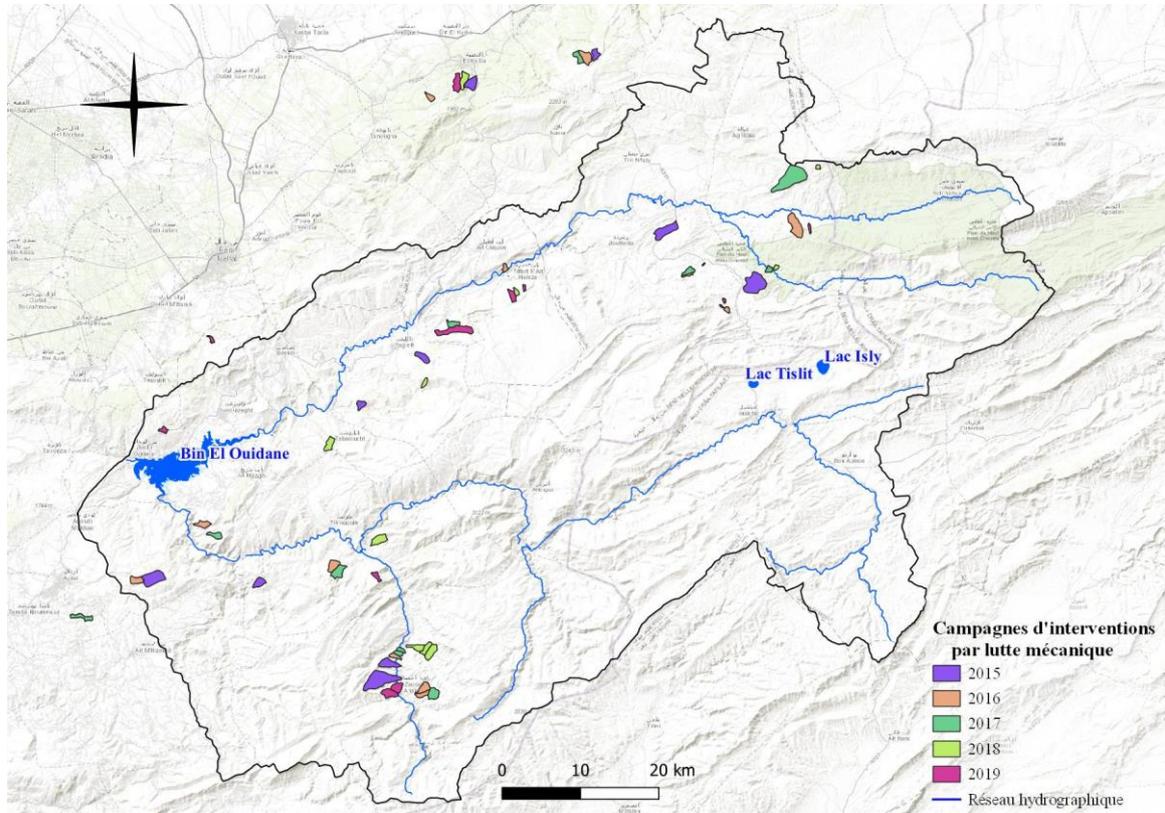


Figure 40 : Carte des pratiques antiérosives par lutte mécanique

Par ailleurs, en l'absence de données déjà compilées, des techniques faisant appel à des images satellitaires permettent de localiser et de caractériser certaines pratiques antiérosives (seuils en pierres sèches, seuils en gabions). Dans le cas de notre zone d'étude, les aménagements agricoles (à l'instar souvent des infrastructures urbaines) sont mis en place avec des ressources locales (terre, graviers, galets). Ainsi, leurs caractéristiques de surface ne les différencient pas du milieu environnant (Photo 23), rendant les techniques de télédétection inopérantes. Ainsi, au regard du manque de données et du peu de surface concernée par les campagnes d'intervention de lutte contre l'érosion, le facteur P du modèle RUSLE est fixé à 1 pour l'ensemble du bassin versant.



Photo 23 : Photo de quelque pratique antiérosive (murettes) de la zone d'étude

2. Evaluation de l'érosion hydrique dans le bassin oued El Abid

L'évaluation, la cartographie et la superposition des différents facteurs de l'érosion (R, K, LS, C, P), opérées à l'aide du SIG, ont permis d'élaborer la carte des pertes en sol du bassin versant de l'oued El Abid, à une résolution de 30 m.

La modélisation aboutit à un taux d'érosion moyen de $14 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, pour une perte globale annuelle de 9,1 millions de tonnes. Afin d'aider à l'analyse, les taux, qui s'échelonnent de 0 à plus que $80 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, sont regroupées en classes, mettant en miroir la surface qu'elles occupent avec la proportion des pertes qu'elles occasionnent (Figure 41).

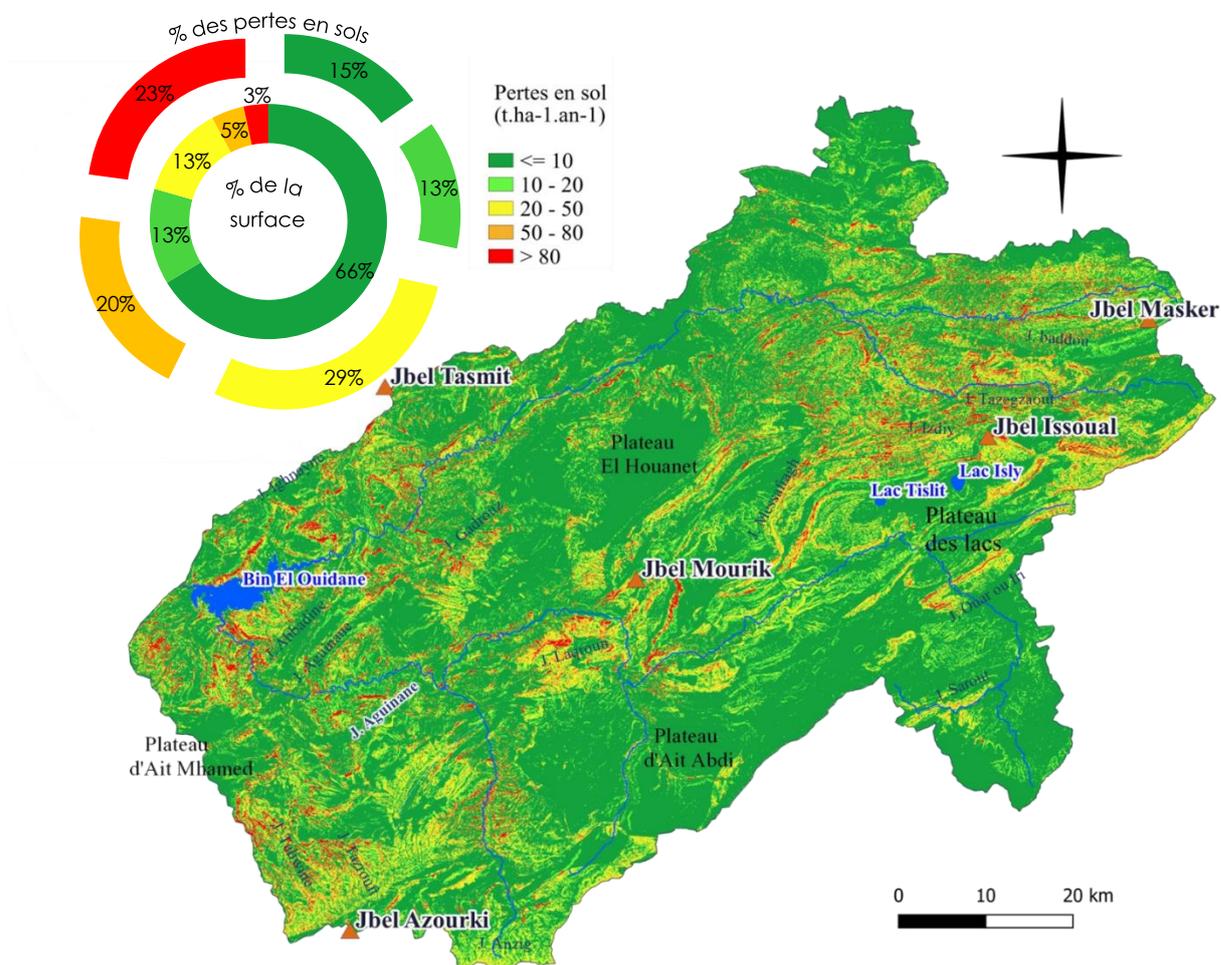


Figure 41 : Carte des pertes en sol dans le bassin versant de l'oued El Abid

Bien que quasi-omniprésente, l'érosion ne s'exprime pas avec la même intensité sur toute la zone d'étude. Ainsi, les taux supérieurs à $20 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ sont responsables de 72 % des pertes, alors qu'ils ne concernent que 21 % de la superficie du bassin versant. Ces taux d'érosion importants concernent principalement des zones montagneuses (Jbel Azourki, Mourik, Issoual, Masker, Tasmit...). Bien que l'érosivité des pluies y soit assez faibles, les pertes résultent de la combinaison de sols sensibles (roche-mère tendre de nature marneuse) et d'une topographie très accidentée (très fortes pentes). Ce dernier facteur alimente tout particulièrement l'énergie mécanique du ruissellement sur les versants, provoquant l'arrachement des particules de sols. De plus, l'érosion prend son ampleur maximale sur les versants dépourvus de couvert végétal, rendus imperméables sous l'effet de la battance et du tassement des sols (Photo 24).



Photo 24 : Effet de l'érosivité des pluies sur les sols nus et formation de la couche de battance

Les zones les plus à risque sont celles dont le couvert est faible, soit en raison des conditions bioclimatiques, soit en raison de l'activité anthropiques. En particulier, la prévention du surpâturage, du défrichement et du déboisement (bois de chauffe) dans ces zones de haute montagne représente une piste d'action prioritaire.

Le reste de la superficie (soit 79 %) délivre quant à elle seulement 28 % des pertes en sol. Cette superficie correspond aux plateaux et dépressions. Les taux d'érosion y sont globalement modérés voire très faibles (inférieurs à $20 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$), en raison de pentes douces, d'un couvert végétal protecteur et d'une érodibilité moindre, et ce malgré une érosivité des pluies plus importante (effet Foehn). En particulier, au niveau des plateaux, la présence de formations karstiques (karst El Houanet karst Jbel Chitou, karst d'Imghal, karst d'Ai mazigh et Karst d'Ait Abdi) constituées de roches carbonatées localement très perméables (fractures et failles) favorisent l'infiltration, limitant drastiquement le ruissellement.

Une réserve peut être apportée quant à l'estimation de l'érosion dans les zones de haute montagne, le modèle RUSLE n'ayant pas été initialement développé pour ce genre de contexte. En particulier, le facteur LS est reconnu surestimé dans ces conditions [134]. Cependant, si la

magnitude des plus forts taux d'érosion peut être discutée, la modélisation indique de manière solide les zones à prioriser dans la lutte contre l'érosion hydrique : les versants nus des reliefs montagneux.

En outre, étant donné que la méthode de modélisation du processus de l'érosion utilisée ne permet d'estimer que l'érosion en nappe, il faut noter que le transport solide total est supérieur, comprenant aussi les autres types d'érosion (ravinement, sapement de berges, badlands).



Photo 25 : Sapement de berge, cours d'eau oued El Abid

Les données quant à la maintenance du barrage Bin El Ouidane (exutoire du bassin versant de l'oued El Abid) font état d'un taux d'envasement annuel moyen de 6,4 millions de tonnes (données 1953-2008 Agence du bassin versant de l'oued Oum Er-Rbia), soit un taux d'érosion moyen du bassin versant d'environ $12 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. L'ordre de grandeur de l'estimation effectuée par le modèle RUSLE (taux moyen de $14 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) est valide, surtout en considérant les phénomènes de resédimentation et de redéposition inhérents au transport solide (toute particule érodée localement ne parcourt pas l'ensemble de la distance le séparant de l'exutoire).

3. Conclusion

Pour conclure, la zone d'étude est constituée essentiellement de relief montagnard avec des écarts altitudinaux élevés et des pentes très fortes. En effet, l'étude morphométrique a montré que l'écart topographique est de plus de 3000 m. Les classes de pentes fortes et très fortes occupent plus de la moitié de la surface. L'hypsométrie montre que le bassin de l'oued El Abid est dans une phase d'évolution érosive importante. Le potentiel érosif dû au relief est important. Tous ces éléments morphométriques font que le bassin versant de l'oued El Abid est fragile de point de vue accentuation des phénomènes érosifs, notamment dus à la pente et sa longueur. L'impact de la réduction du couvert végétal (défrichements, labours, surpâturage), élément majeur de la protection, est favorisé et accentué par l'influence des changements climatiques. D'une manière extrême et spectaculaire, on assiste à la création de badlands une fois la couverture végétale éradiquée par les usages.

Par ailleurs, l'érosion hydrique peut également affecter la qualité des cours d'eau à cause des matières en suspension mais également à cause des formations géologiques salines. Ainsi, les cours d'eau oued El Abid et Assif Ahnsal touchés par l'érosion présentent fréquemment des problèmes de salinité.

Chapitre 2 : Erosion de la région Nord-Pas-de-Calais

1. Résultats des facteurs

1.1. Érodibilité des sols

La spatialisation des données du facteur K des différentes stations est présentée sur la figure suivante

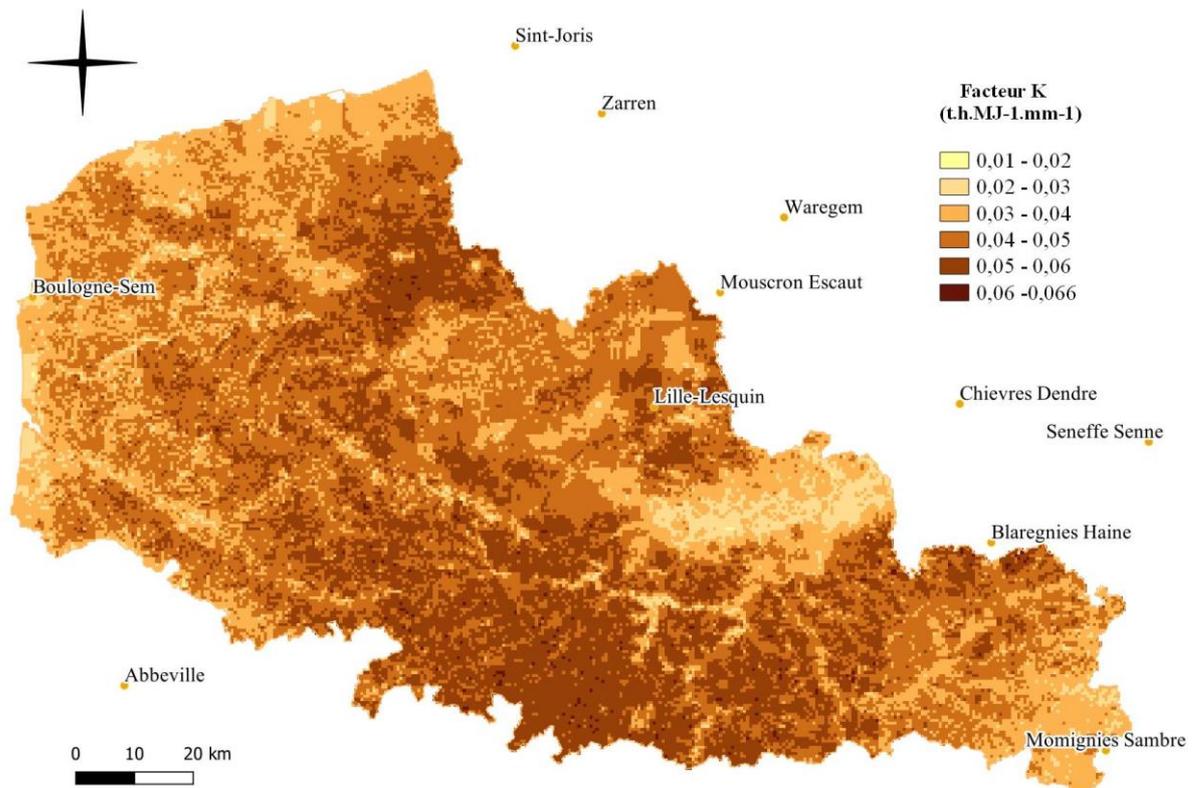


Figure 42 : Carte d'érodibilité de sol du Nord-Pas-de-Calais

Les facteurs K les plus élevés (supérieur à $0,05 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$) correspondent aux sols calcaires lessivés que l'on trouve en Artois et dans les Flandres, et couvrent 29% de la superficie de la région. Les catégories de sols bruns limoneux présentent une érodibilité intermédiaire ($0,03$ à $0,05 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$) tandis que les catégories alluviales et hydromorphes (7% de la superficie) sont les moins érodables.

1.2. Occupation du sol

Dans le Nord-Pas-de-Calais, la répartition de l'occupation des sols est fondée sur deux sources de données :

- CORINE LAND COVER 2018, la dernière version de l'inventaire biophysique européen de l'occupation des sols.
- RPG 2019, la base de données contenant les déclarations des agriculteurs sur la mise en culture de leurs parcelles, obligatoires pour obtenir les financements de la politique agricole commune européenne.

Ces données sont disponibles sous un format SIG numérisé, permettant une caractérisation spatiale très précise (Figure 43).

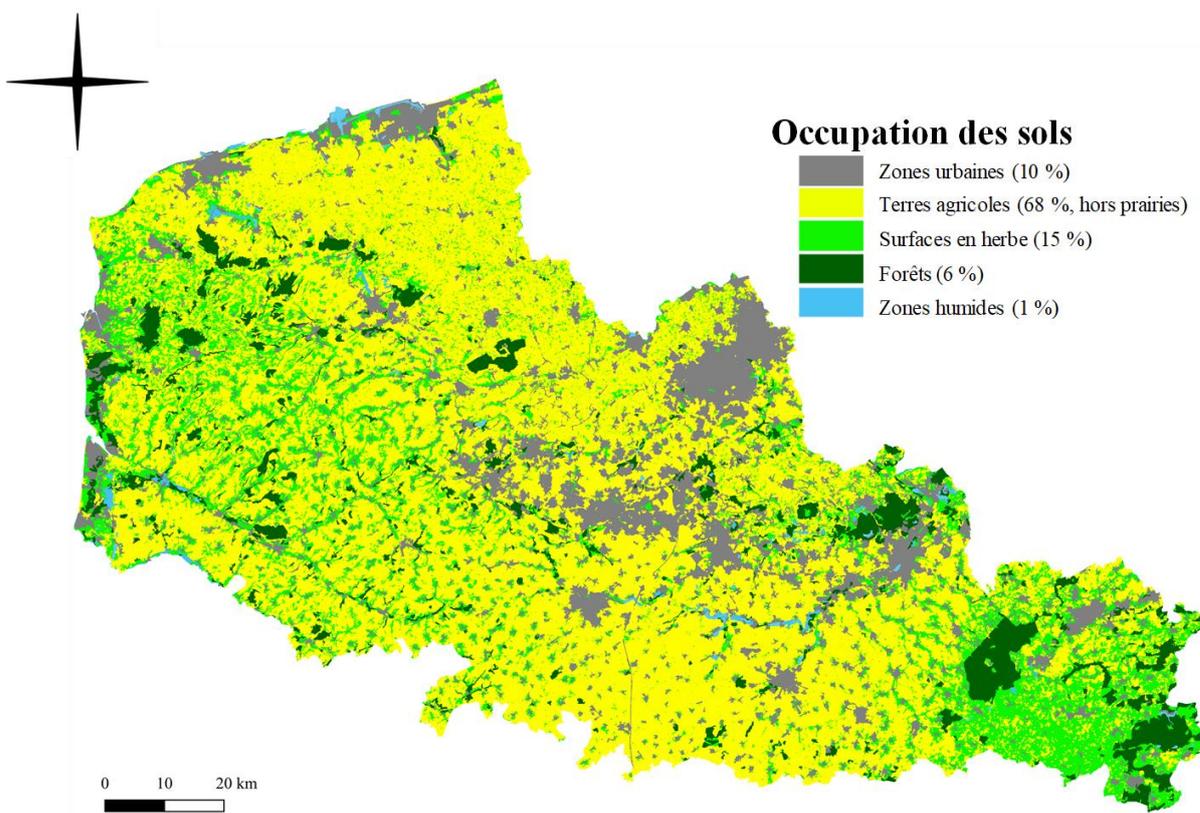


Figure 43 : Carte d'occupation des sols

Pour les terres agricoles, le type de culture le plus représenté dans la région est celui des céréales d'hiver (principalement le blé). Elles sont semées à l'automne, peu de temps après leur récolte, ce qui assure une couverture du sol pendant l'hiver et un niveau de développement déjà élevé au printemps. La plupart des autres cultures (maïs, légumes, etc.) sont semées au printemps, plusieurs mois après leur récolte, qui a également lieu à la fin de l'été ou en automne. Pour ces types de culture, la couverture du sol pendant l'hiver est très faible et leur

développement culmine plus tard (pendant l'été) que celui des cultures d'hiver. Par conséquent, les cultures d'hiver ont été associées à un facteur C plus faible que les autres cultures pour l'hiver (0,3 maximum alors que les champs au semis printaniers sont associés à un C allant de 0,6 à 0,8) et le printemps (pour tenir compte de leur stade de développement plus avancé).

En parallèle, les cultures d'intersaison protègent les sols pendant l'automne et l'hiver, et améliorent également la structure du sol pour le reste de l'année. Appliquée sur une parcelle, cette stratégie culturale est représentée par un facteur C de 0,3 pendant l'automne et l'hiver, et une réduction d'un tiers de la valeur C initiale pour le printemps et l'été (pour tenir compte de l'influence sur la structure du sol). Cette paramétrisation est inspirée des valeurs utilisées dans les études considérant les rotations interannuelles des cultures [135] [136].

Les terres agricoles qui ne sont pas couvertes par les déclarations RPG sont associées par défaut au modèle de facteur C des cultures de printemps, sans culture intermédiaire. Les catégories d'utilisation des sols plus statiques (par exemple l'arboriculture et les prairies) sont associées à des valeurs de C constantes au cours de l'année (Tableau 7).

Tableau 7 : Valeurs du facteur C pour chaque classe d'occupation de sols

Occupation de sol (%)	Facteur C (facteur C avec cultures intermédiaires)			
	Printemps	été	Automne	Hiver
Zones urbaines (10%)	0			
Prairies (15%)	de 0.001 à 0.005			
Forêts (6%)	0.001			
Zones humides (1%)	0.002 to 0.007			
Terres agricoles (68%) <i>Cultures principales</i> <i>% des terres agricoles (dont % de cultures intermédiaires)</i>				
Céréales d'hiver 51% (40%)	0.1 (0.07)		0.7 (0.3)	0.3 (0.2)
Maïs 12% (1%)	0.4 (0.3)	0.2 (0.13)	0.8 (0.3)	
Betteraves 10% (<1%)	0.5 (0.35)	0.4 (0.3)	0.8 (0.3)	
Pomme de terre 10% (<1%)	0.5 (0.35)	0.4 (0.3)	0.8 (0.3)	
Autres légumes 6% (5%)	0.35 (0.25)	0.2 (0.13)	0.7 (0.3)	
Oléagineux 4% (1%)	0.3 (0.2)	0.1 (0.07)	0.7 (0.3)	

Référence des valeurs du facteur C: [135] [137] [136]

Des informations supplémentaires sont fournies sur les pratiques agricoles dans le Nord-Pas-de-Calais. Les céréales d'hiver (principalement le blé) sont la culture prédominante (51% des terres agricoles), et sont déjà largement associées à la culture intermédiaire (40%).

Pour les autres cultures industrielles, cette pratique est très marginale. Les facteurs C les plus élevés ont été associés aux pommes de terre et aux betteraves, compte tenu de la faible couverture foliaire qu'elles développent, surtout pour ces dernières dont le cycle de croissance s'étend sur deux ans. De plus, leurs méthodes de récolte (coupe des feuilles et élimination mécanique des racines massives) rendent le sol plus vulnérable à l'érosion.

Globalement, la meilleure couverture est assurée entre le printemps et l'été, lorsque toutes les cultures sont au sommet de leur croissance. En automne, le processus de récolte laisse le sol sans protection contre les précipitations, ce qui est illustré par les valeurs de facteur C les plus élevées. Pour la plupart des cultures, ce facteur C reste élevé pendant l'hiver, puis diminue au printemps. Pour les cultures d'hiver, la croissance est précoce, donc le facteur C est moins dégradé en hiver qu'en automne, et la couverture au printemps est réputée similaire à celle de l'été.

Afin d'évaluer le potentiel de la culture intermédiaire comme technique de réduction de la perte de sol dans le Nord-Pas-de-Calais, un calcul secondaire est mené avec le facteur C approprié étendu à toutes les parcelles qui n'y sont pas encore soumises, selon les données du RPG 2019.

Résultat de la combinaison de la carte d'occupation des sols et de la saisonnalité de la couverture végétale, est la distribution spatiale et temporelle du facteur C, présentée dans la Figure 44.

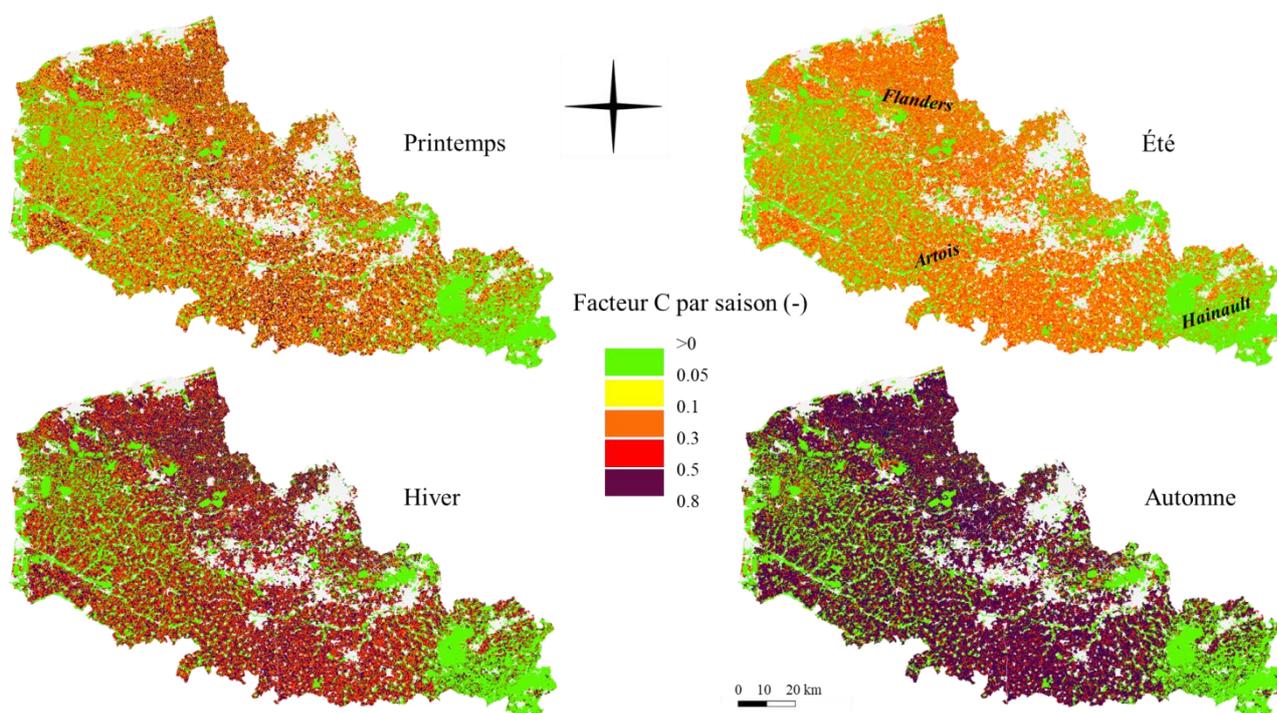


Figure 44 : Carte du facteur d'occupation de sols

Le Nord-Pas-de-Calais étant principalement couvert par des cultures industrielles, les valeurs élevées du facteur C sont largement représentés dans la région. La sous-région du Hainaut (Sud-Ouest), dominée par les pâturages et les prairies, mais aussi les franges côtières et la proximité des rivières, constituent les zones de faibles valeurs du facteur C.

Le cycle temporel de ce facteur est opposé à celui de l'érosivité des précipitations : l'été est associé aux valeurs les plus faibles (moyenne : 0,095). En raison d'une forte proportion de cultures semées tôt (blé d'hiver), la saison hivernale est caractérisée par un facteur C plus faible (0,293) que l'automne (0,377), la saison la moins protectrice en termes de couverture végétale. Par ailleurs, la valeur moyenne du printemps (0,145) se situe à mi-chemin entre l'hiver et l'été, ce qui correspond au schéma de croissance des cultures.

1.3. Topographie

Le facteur topographique (LS) représente l'influence combinée de l'inclinaison et de la longueur de la pente. En augmentant l'énergie cinétique du ruissellement, l'inclinaison est un facteur critique pour le déclenchement de l'érosion (c'est-à-dire pour vaincre les forces de cohésion du sol et détacher les particules). En particulier, sur les pentes les plus raides, elle devient prédominante par rapport à l'énergie cinétique propre de la pluie. Wischmeier & Smith

(1965). [125] ont montré que même sur de petites parcelles, le ruissellement augmente avec la pente, mais son influence est régulée par la rugosité de la surface du sol et la capacité de rétention d'eau (type de culture et niveau de saturation avant la pluie). D'autre part, plus la pente est longue, plus le potentiel de pertes dans le sol est important, d'autant plus que des phénomènes de concentration du flux se produisent.

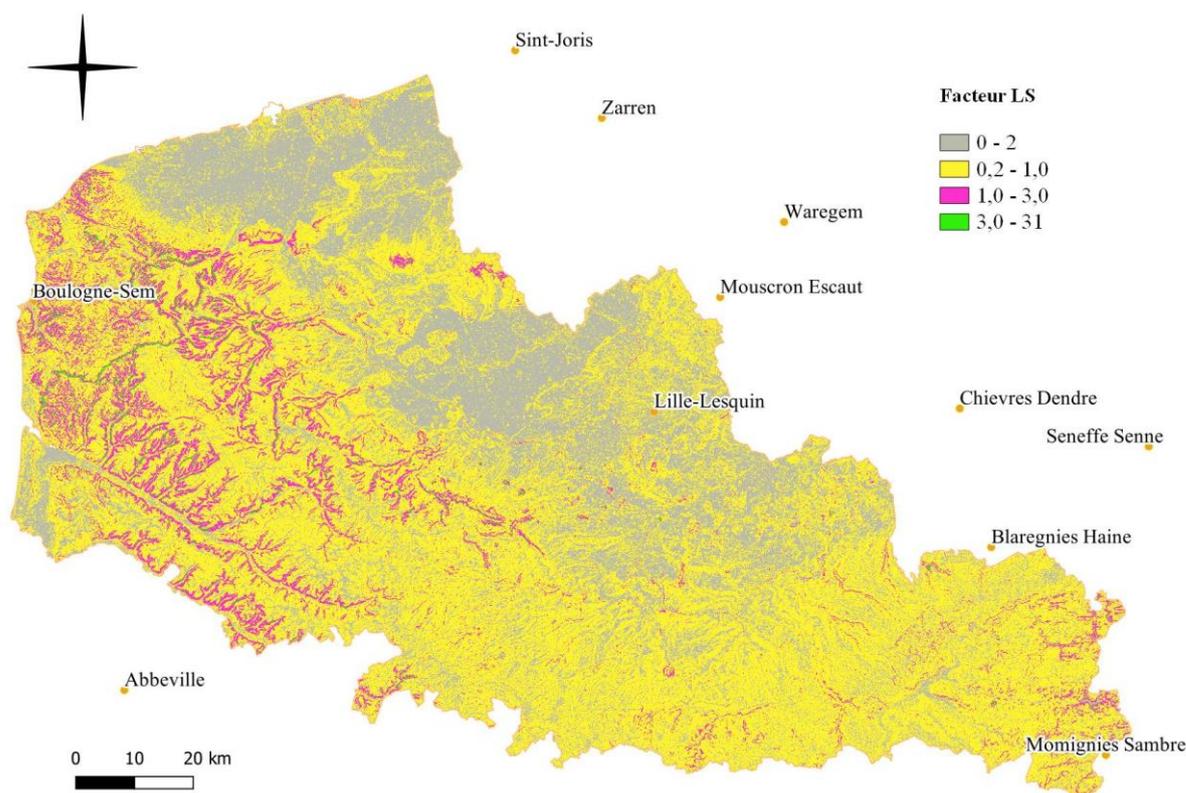


Figure 45 : Carte du facteur topographique

La Figure 45 montre que le facteur LS est dérivé de la topographie, par conséquent, les zones de relief sont associées à des valeurs élevées. Les valeurs les plus élevées sont situées le long des rivières, leurs berges constituant les pentes les plus fortes.

La majeure partie de la zone d'étude est caractérisée par un relief très doux et donc par des valeurs de facteur topographique très faibles.

1.4. Érosivité des pluies

Le facteur R, est calculé pour chaque mois sur une année entière par le Centre européen de données sur les sols (ESDAC). Pour la présente étude les facteurs d'érosivité mensuels sont additionnés pour obtenir un facteur R saisonnier (printemps : avril à juin, été : juillet à septembre, automne : octobre à décembre, hiver : janvier à mars). L'érosivité totale des précipita-

tions sur une année est représentée sur la Figure 46, montrant que la distribution du facteur R est principalement contrôlée par le relief, avec les valeurs les plus élevées près des collines de Flandre et des pentes du Hainault (entre 500 et 600 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹).

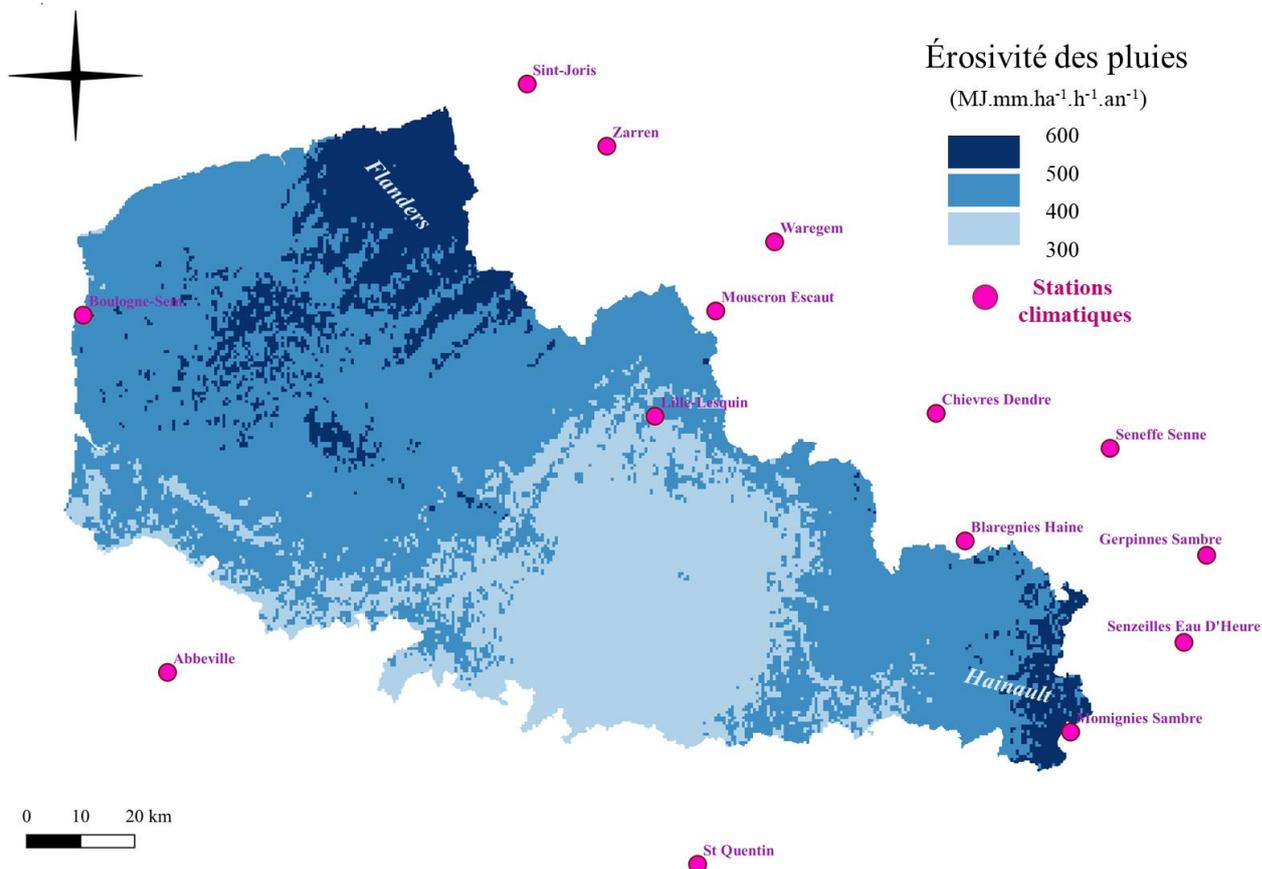


Figure 46 : Érosivité des pluies dans le Nord-Pas-de-Calais

Alors que les paramètres précédents sont considérés comme statiques, le facteur R montre une disparité intra-annuelle significative (Figure 47). La moitié de l'érosivité annuelle se produit pendant l'été (événements orageux) et très peu pendant l'hiver (bruine), décrivant une dynamique inverse à celle du facteur C. Le reste de l'érosivité est presque également réparti entre le printemps et l'automne (22,6% et 20,5% respectivement).

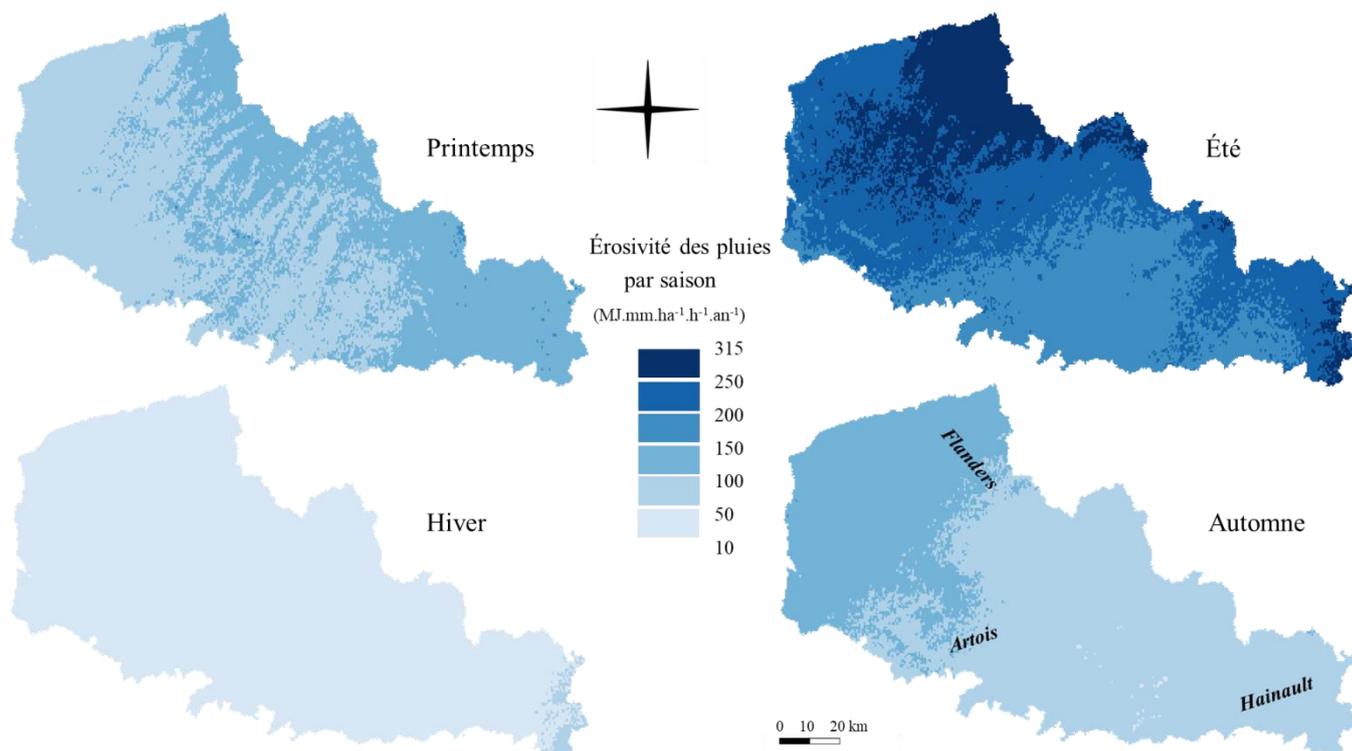


Figure 47 : Carte d'érosivité des pluies par saison dans le Nord-Pas-De-Calais

Spatialement, les valeurs sont moins dispersées, avec un écart-type relatif (RSD, Tableau 8) variant entre 9,7% (hiver) et 14,1% (automne). Néanmoins, les précipitations les plus érosives, comme le montre déjà la figure 2, sont situées près des collines de Flandre et des reliefs du Hainault (effet de foehn).

Tableau 8 : Érosivité des pluies par saison et par an

	Facteur R (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹ .y ⁻¹)				
	Min	Max	moyenne	RSD	Contribution
Printemps	48.6	174.9	98.7	10.9%	22.6%
Été	153.1	315.9	219.9	10.3%	50.4%
Automne	45.7	164.3	89.6	14.1%	20.5%
Hiver	14.4	68.9	27.9	9.7%	6.3%
Somme de l'année	305.6	597.4	436.2	9.2%	

Les valeurs résultent de l'addition des données mensuelles R (ESDAC)

1.5. Pratiques antiérosives

Les pratiques anti-érosives sont intégrées à RUSLE comme facteur correctif (P) représentant les techniques culturales de conservation, autres que les techniques de couverture, déjà prises en compte par le facteur d'occupation du sol.

Dans cette étude, le facteur P n'a pas été utilisé car aucune donnée n'est disponible à la résolution souhaitée. L'ESDAC fournit une estimation à grande échelle qui ne ferait que biaiser l'objet de l'étude, qui prend en compte l'occupation du sol et les pratiques (cultures intermédiaires) à l'échelle de la parcelle.

2. Evaluation de l'érosion hydrique dans le Nord-Pas-de-Calais

2.1. Saisonnalité et ampleur de l'érosion hydrique

Les principaux résultats du processus de modélisation sont des cartes de perte de sol saisonnière avec une résolution spatiale de 25 m (Figure 48).

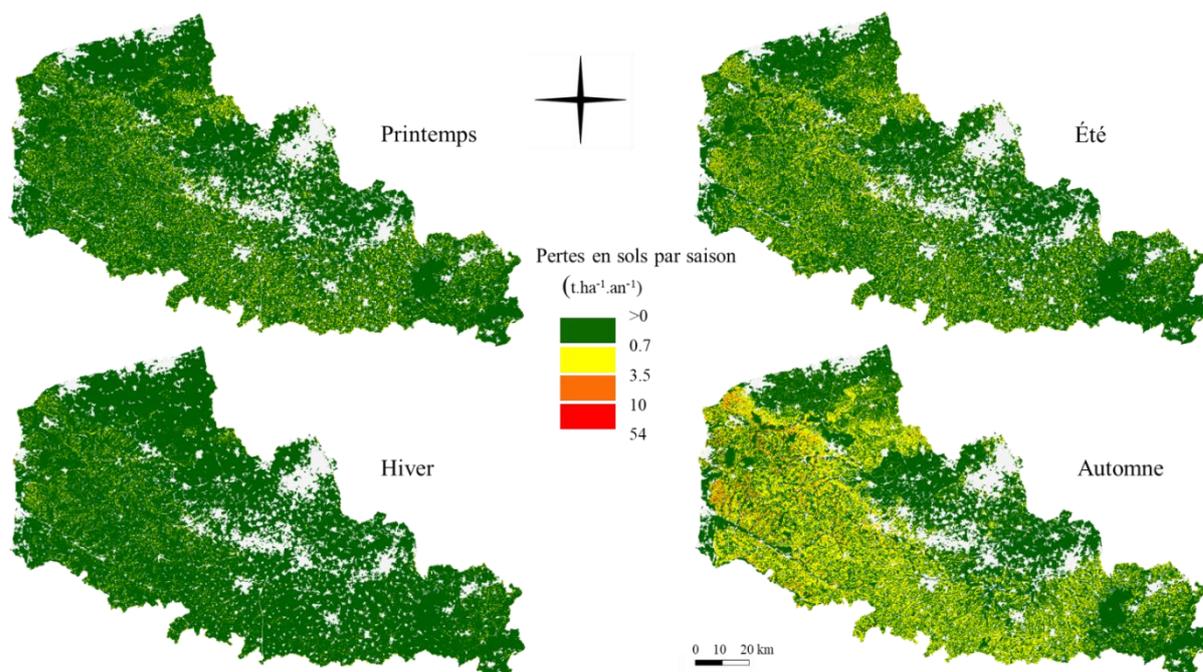


Figure 48 : Carte des pertes en sol par saison dans le Nord-Pas-de-Calais

Bien que l'érosivité des pluies soit concentrée en été, le niveau élevé de développement des cultures assure une perte de sol modérée pendant cette saison (représentant 26% de la perte annuelle totale). En revanche, durant l'hiver, les précipitations délivrent une énergie cinétique très faible et les pertes de sol sont minimales (11% du total), même si les facteurs C sont assez élevés. La désynchronisation des cycles des facteurs C et R (Figure 49) se traduit également par une faible contribution du printemps (17%) et un apport majoritaire durant l'automne (46%), avec une perte maximale, pour le lieu (pixel) le plus dégradé, à 36 t/ha/an (cette valeur correspondant à la perte de sol survenant en une saison de l'année).

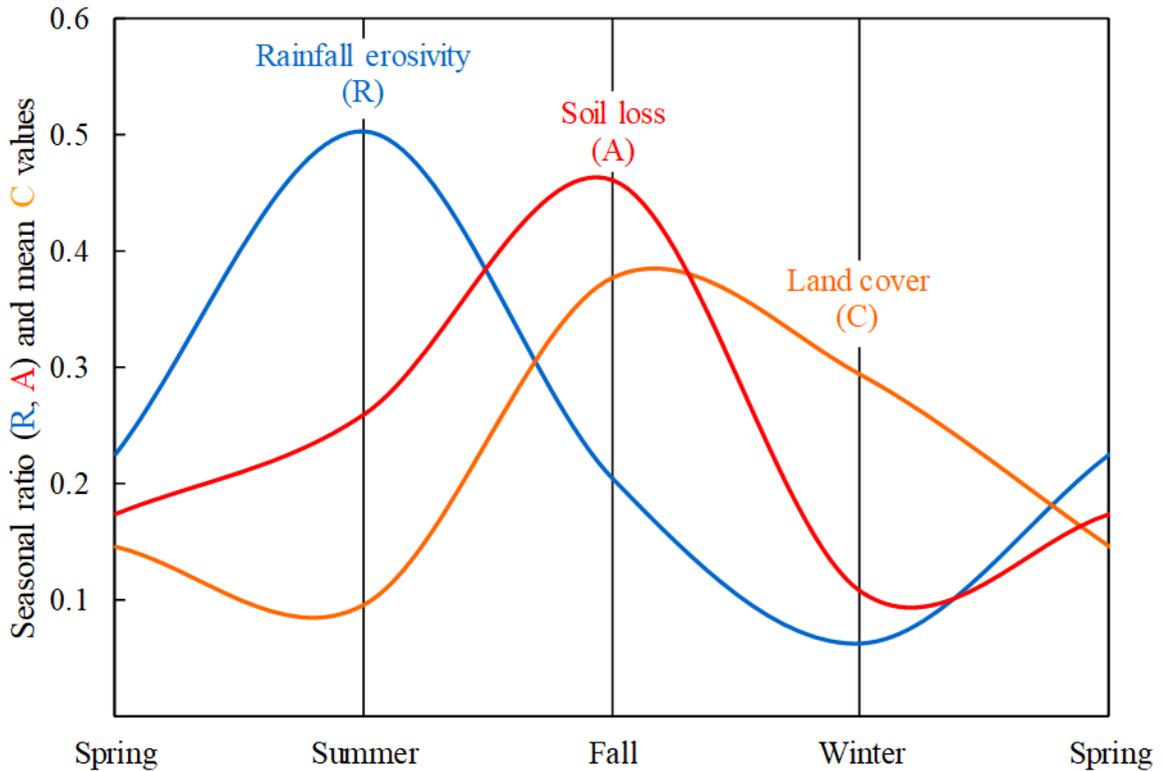


Figure 49 : Cycles d'influence annuelle de chaque paramètre RUSLE sur les pertes en sol

Une carte de perte de sol annuelle, résultant de l'addition des taux saisonniers, est mise en comparaison avec les résultats de l'ESDAC (année 2016) sur la Figure 50. En cumulant sur l'année, les taux d'érosion calculés dans l'étude varient entre 0 et 54 t/ha, pour un total de 1,69 Mt de pertes sur la région Nord-Pas-de-Calais.

Les estimations de l'ESDAC sont au maximum de 23 t/ha, pour une perte totale de 1,32 Mt. Cette divergence est principalement due à une paramétrisation différente de C : la valeur moyenne de C de l'ESDAC est de 0,157 alors que cette étude considère un C moyen de 0,228 sur l'année. En particulier, les valeurs de C de l'ESDAC ne dépassent jamais 0,26, même pour les cultures industrielles, alors que, dans cette étude, le C annuel moyen du maïs, des betteraves et du blé est respectivement de 0,5, 0,63 et 0,3. Ces valeurs sont plus cohérentes avec la littérature [135] [137] [136]. Par ailleurs, le calcul de l'ESDAC intègre un ratio de pratique anti-érosion (facteur P allant de 0,75 à 1) qui n'a pas été retenu dans cette étude, en l'absence de données à l'échelle de la parcelle.

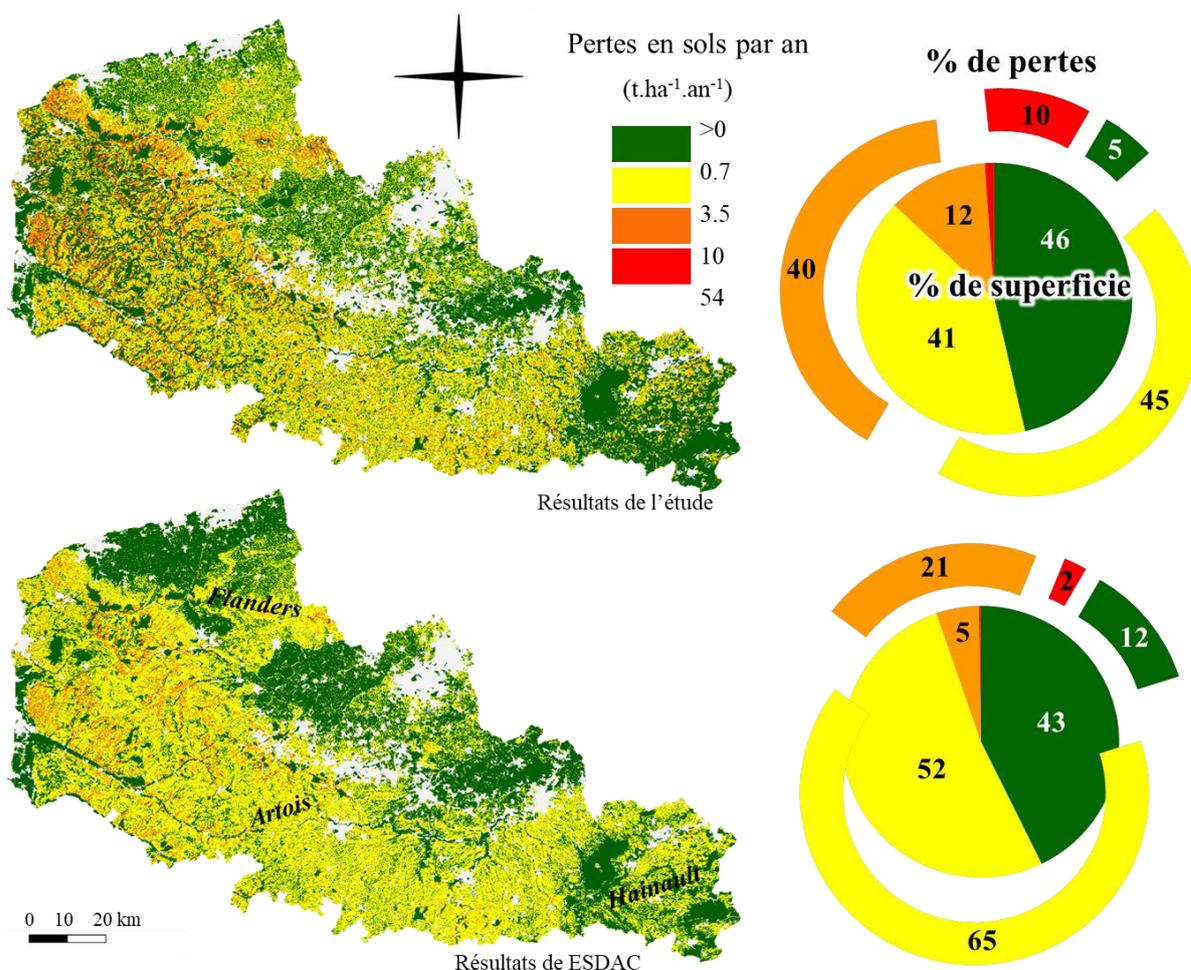


Figure 50 : Pertes en sol annuelle et comparaison avec les résultats de l'ESDAC

D'autre part, en représentant mieux le cycle temporel de la croissance des cultures et l'hétérogénéité intra-annuelle du climat, l'approche saisonnière tend à réduire les pertes calculées dans le Nord-Pas-de-Calais, par rapport aux valeurs qui seraient obtenues avec les facteurs C moyennés de notre étude. En effet, dans ces conditions, RUSLE estimerait une perte annuelle totale de sol de 1,83 Mt.

2.2. Distribution spatiale et classification de l'érosion hydrique

La classification choisie pour représenter les différents degrés de perte de sol (Figure 48 et Figure 50) est basée sur une échelle irrégulière avec un fort raffinement à l'endroit des faibles taux d'érosion, afin de pouvoir évaluer leur contribution à la perte globale. Les taux les plus bas (<0,7 t/ha/an) sont situés dans les prairies (y compris les bandes tampons près des parcelles cultivées) et là où le facteur topographique est très faible (<0,2). Englobant la majeure partie du Bas Pays, mais aussi la sous-région du Hainault, cette classe représente 46% de la superficie de la région mais ne compte que pour 5% de la perte totale (Figure 50). La deuxième classe contributive est de taux intermédiaire (de 0,7 à 3,5 t/ha/an), et génère des pertes

proportionnelles à sa surface (45% des pertes pour 41% de la surface). Ceci peut être analysé comme la perte de sol de fond se produisant de manière quasi omniprésente sur les parcelles (hors surfaces en herbe) du Nord-Pas-de-Calais, dans sa structuration agricole actuelle. Les classes les plus contributrices (>3,5 t/ha/an) sont situées sur les pentes les plus fortes de la région (sous-régions Artois et Flandres). Leur étendue est donc très limitée (13%) mais leur contribution est majeure (50%). Les mêmes sous-régions agricoles (Flandres et Artois) sont associées à un risque d'érosion fort à très fort par la carte régionale des risques MESALES. La distribution spatiale du calcul ESDAC est également très comparable à celle de l'étude.

Les proportions de pertes attribuables à chacun des principaux types de cultures sont indiquées dans le Tableau 9. Normalisée par la proportion de la surface agricole utile occupée, cette valeur donne une indication de la productivité des pertes de sol pour chaque type de culture. En raison de la prédominance des cultures à semis précoce et de l'association avec les cultures intermédiaires, les céréales sont les moins productives en termes d'érosion (ratio de 0,7). A l'inverse, le maïs et la betterave sont superproductifs en pertes de sol, avec un ratio de 1,6. Les cultures de pommes de terre sont situées dans des zones où la sensibilité à l'érosion est moindre grâce aux autres facteurs, ce qui se traduit par un ratio plus faible (1,3) bien qu'elles présentent les mêmes facteurs C que les betteraves.

Tableau 9 : Pertes en sol par type de culture

	% de superficie	% de pertes en sol	partes/superficie ratio
Céréales	53.	38	0.7
Maïs	12	19	1.6
Betteraves	10	16	1.6
Pomme de terre	10	13	1.3
Oléagineux	4	4	1.0
Autres cultures	11	10	0.9

Les autres couverts (zones urbaines, prairies, forêts) génèrent moins de 1% de la perte totale.

2.3. Estimation du potentiel des techniques de cultures intermédiaires

Comme présenté précédemment, la technique de culture intermédiaire est retranscrite dans le modèle RUSLE grâce à des valeurs de C plus faibles, notamment en automne et en hiver. La généralisation de ces valeurs minorées de C dans l'ensemble du Nord-Pas-de-Calais donne une quantification du potentiel de la technique des cultures intermédiaires pour la réduction du processus d'érosion des sols.

Les résultats de ce modèle prospectif sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Résultat du scénario d'extension des cultures intermédiaires

	Printemps	été	Automne	Hiver	Total
Pertes en sol (Mt) avec des cultures intermédiaires étendues	0.22	0.32	0.42	0.11	1.07
Réduction par rapport à la situation actuelle	26%	27%	46%	40%	37%
Contribution saisonnière à la réduction totale	12%	19%	58%	11%	

La réduction saisonnière au printemps et en été est à peu près égale à la modification du facteur C, imposée aux 2/3 de sa valeur sans culture intermédiaire (pour tenir compte de l'amélioration de la structure du sol). Le pourcentage de réduction est légèrement inférieur en raison des parcelles (principalement du blé) déjà concernées par cette technique. Les réductions saisonnières les plus importantes ont lieu en automne et en hiver, les valeurs de C étant plafonnées à 0,3 pendant ces saisons. Globalement, le modèle prévoit une diminution des pertes annuelles supérieure à 1/3, plus de la moitié du gain se produisant en automne.

2.4. Avantages et limites de l'étude

Par rapport aux applications RUSLE calculant une moyenne annuelle, l'approche saisonnière de l'étude représente mieux le cycle du couvert végétal et son rôle protecteur contre l'érosivité des pluies, variant également selon la période de l'année. Ces deux cycles de facteurs étant déphasés, l'effort de discrétisation temporelle apparaît très approprié.

En parallèle, la mise en œuvre de données culturales à haute résolution, tant en termes de catégorisation (type de culture précis) que de localisation (échelle de la parcelle), confère au résultat (cartes de perte de sol) une grande opérabilité. En effet, ces cartes peuvent être utilisées par les acteurs, à différentes échelles de sous-régions, pour localiser, prioriser leur action

mais aussi leurs interlocuteurs. Grâce aux chiffres agrégés pour un type de culture spécifique, des groupes d'action peuvent être constitués par les agriculteurs concernés.

La discrétisation temporelle intra-annuelle a également été utilisée pour évaluer l'apport de la technique des cultures intermédiaires. Mais cette échelle de temps n'est pas la seule appropriée pour évaluer l'influence de l'agriculture sur le phénomène d'érosion hydrique. En particulier, la structuration du sol se déroule sur plusieurs années, et est fortement influencée par les rotations de cultures. L'extension de la méthodologie saisonnière à plusieurs années (les données de l'enquête RPG étant publiées chaque année), avec un facteur C modulé par la rotation des cultures, est perçue comme une suite logique de l'étude actuelle.

Enfin, si la cartographie à grande échelle peut être utilisée à des fins locales, elle devrait être contrôlée par calibration avec des données de terrain, afin de vérifier sa cohérence vis-à-vis de l'échelle et de la localité considérée.

3. Conclusion

L'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE) a été utilisée pour évaluer l'étendue et la dynamique de l'érosion hydrique du sol dans la région Nord-Pas-de Calais (France), avec une discrétisation temporelle saisonnière et des données agricoles précises (à la fois en termes de classification et de localisation).

En raison d'un décalage temporel entre les cycles intra-annuels du paramètre représentant la croissance de la culture d'une part, et l'érosivité des précipitations d'autre part, l'automne s'est avéré être la saison la plus contributive de l'année en termes de pertes de sol (46% du total annuel de 1,69 Mt). À cette saison, la plupart des parcelles sont laissées nues après la récolte, ce qui rend les sols très vulnérables aux événements pluvieux. En hiver, la couverture végétale est également assez faible (à l'exception des parcelles cultivant des céréales d'hiver), mais l'érosivité des pluies n'est pas assez élevée pour entraîner une grande érosion (seulement 11 % du total). Les événements pluvieux les plus agressifs se produisent en été, mais le développement des cultures est à son maximum, assurant des pertes modérées (26%).

Les cultures de céréales d'hiver, surtout lorsqu'elles sont associées à des cultures d'intersaison, sont les moins sujettes à l'érosion hydrique, tandis que les cultures de maïs et de betteraves (n'intégrant presque jamais de cultures intermédiaires) sont les plus productrices de pertes de sol dans le Nord-Pas-de-Calais. Le calcul du modèle avec un scénario d'extension de la technique des intercultures a montré un potentiel de réduction des pertes de 37% sur une année.

L'érosion hydrique des sols est quasi omniprésente dans la région. Les zones les plus protégées sont les prairies (Hainault). Les sous-régions à risque sont les collines de l'Artois et les Flandres, caractérisées par les pentes les plus fortes, et donc par les pertes les plus élevées (jusqu'à 54 t/h/an). L'approche saisonnière de l'étude donne une meilleure image des para-

mètres influençant l'érosion hydrique (couverture végétale, distribution des précipitations) tout en étant cohérente avec les propres calculs de l'ESDAC. Les données de culture à haute résolution donnent également une grande opérabilité aux cartes et aux taux générés, permettant de cibler des groupes spécifiques d'agriculteurs ainsi que de prioriser et de construire des actions appropriées en fonction du type de culture. Cependant, l'extension temporelle de l'étude (calcul de RUSLE sur une seule année) peut être considérée comme lacunaire, une grande partie de la structuration (ou de l'affaiblissement) du sol ayant lieu au fil des années et des rotations de cultures.

Chapitre 3 : Résultats des deux zones et préconisations

1. Evaluation des résultats des deux zones d'études

Les gammes d'érosion estimées dans les 2 zones d'études ne recouvrent pas les mêmes ordres de grandeur. Le Nord Pas-de-Calais est caractérisé par une prédominance de faibles taux d'érosion, avec un maximum à 50 t.ha⁻¹.an⁻¹. Dans le bassin Oued El Abid, la majorité des taux dépasse 20 t.ha.an⁻¹ avec des maximums supérieurs à 100 t.ha.an⁻¹. Afin de comparer ces deux systèmes aux caractéristiques physiques (climat, topographie, pédologie, usage des sols) très différentes, les valeurs peuvent être étudiées après normalisation.

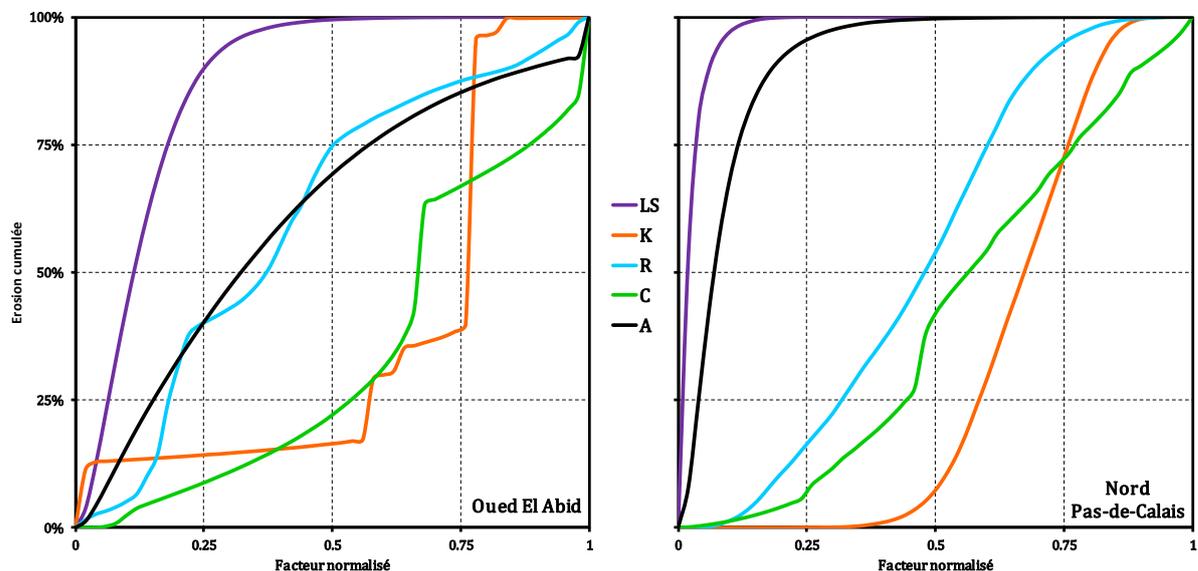


Figure 51 : Répartition des facteurs RUSLE (à gauche, oued El Abid ; à droite, Nord Pas-de-Calais)

La Figure 51 met en exergue la distribution des facteurs RUSLE et des taux d'érosion en fonction des pertes globales pour chaque zone d'étude. L'abscisse porte les facteurs et les taux normalisés en fonction de leur étendue propre (définie par la différence entre leur valeur maximale et leur valeur minimale). L'ordonnée porte les pertes en sols cumulées en proportion de l'érosion totale de la zone en question.

Les courbes des taux A retranscrivent les typologies d'érosion déjà commentées dans les sections précédentes. En l'occurrence, dans le bassin Oued El Abid, les taux d'érosion inférieurs à la moyenne de la zone (<0,5 de l'échelle normalisée) produisent environ 70 % des pertes totales, contre 100 % dans le Nord Pas-de-Calais. Cette différence majeure résulte principalement de contextes topographiques opposés : la zone marocaine est caractérisée par de fortes pentes (haute-montagne) quand le Nord de la France est particulièrement plat. Le premier

décile du facteur LS (soit les 10 % des pentes les plus faibles) y est le lieu de la totalité des pertes.

La différence climatologique entre les deux sites apparaît également. L'érosion est presque parfaitement corrélée avec l'érosivité des pluies en Nord Pas-de-Calais (50 % des pertes sont imputables à 50 % de l'érosivité R). Ce résultat est cohérent avec un régime de pluie assez équitablement réparti à la fois spatialement et temporellement. En contraste, l'influence du facteur R est plus modérée dans le Haut Atlas puisque les zones soumises aux érosivités les plus faibles ($R < 0,5$) produisent les 3/4 des pertes. Cela confirme le facteur prédominant des autres facteurs, au premier lieu desquels les pentes, les faibles érosivités touchant particulièrement les zones escarpées du bassin versant.

La répartition des facteurs liés à la pédologie (K) et à la couverture des sols (C) sont les plus semblables, notamment en raison de différences d'échelle moindre entre les deux sites. Cependant, la forme en palier des courbes d'oued El Abid retranscrit la démarche de modélisation, qui a défini ces facteurs avec un nombre assez limité de classes. Dans le Nord Pas-de-Calais, l'érodibilité a été cartographiée par interpolation de valeurs établis par des tests pédologiques, donnant à la courbe cette allure continue. En outre, le nombre de classe d'occupation des sols y est également bien plus élevé, en raison d'un tissu agricole diversifié.

Dès lors, même si le diagnostic quant à l'influence majeure de la couverture des sols vaut pour les deux zones, les conclusions quant aux possibilités d'action diffèrent drastiquement. Dans le Nord Pas-de-Calais, la lutte contre l'érosion passe nécessairement par la contribution des agriculteurs et l'adaptation de leurs pratiques agricoles. Dans le Haut Atlas, les sols sont nus pour une grande part du fait de processus naturels et d'un climat peu propice à la croissance végétal. La lutte contre l'érosion doit donc s'y jouer sur deux aspects : maintenir l'équilibre naturel dans les zones concernées (éviter l'extension et l'augmentation du pâturage ainsi que le déboisement) et des mesures correctives là où il est déjà perturbé (reboisement, luttés mécaniques et biologiques).

2. Préconisations spécifiques au bassin versant El Abid

Pour diminuer l'érosion des sols dans le bassin versant de l'oued En Abid, il faut renforcer encore l'utilisation des techniques suivantes :

- Sensibilisation des populations concernées aux problèmes de dégradation des sols.
- Aménagement et valorisation des terres : épierrage, construction de murettes, de cordons et d'éléments de banquettes ;
- Correction des ravins et stabilisation des berges des oueds : construction de seuils, d'épis, de murs de soutènement, plantation d'arbres et arbustes forestiers (actions biologiques) ;
- Distribution et plantation d'arbres fruitiers et forestiers (amandier, olivier, pommier, noyé, cerisier, caroubier, acacia) ;
- Production végétale : amélioration des cultures céréalières, légumineuses, maraîchères et fourragères (blé tendre, blé dur, lentille, vesce avoine, maïs, luzerne, bersim, sorgho, pomme de terre, petit pois) par la distribution des engrais et la vulgarisation de techniques culturales adéquates ;
- Equipement agricole : introduction de matériel pour les traitements phytosanitaires (pulvérisateurs) et pour la taille des arbres (scies, sécateurs) ;
- Contrôler les surpâturages.

La lutte contre l'érosion des sols doit associer les méthodes mécaniques et biologiques. En effet, la lutte mécanique est indispensable et efficace temporairement mais exige une fixation biologique rapide des atterrissements, des versants et de l'amont des ravines. L'aménagement mécanique et biologique d'une ravine peut être réalisé progressivement mais il doit concerner tout le bassin versant dès la première année. La fixation biologique d'une ravine vient consolider les versants et le fond de ravine stabilisé par différents types de seuils.

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, dix commandements doivent être respectés pour l'aménagement des ravins :

1. Tant que l'infiltration n'a pas été corrigée sur le bassin versant, il ne faut pas tenter de reboucher la ravine (sinon elle trouvera un autre lit), mais plutôt prévoir un canal stable capable d'évacuer les débits de pointe de la crue décennale (au minimum).
2. L'aménagement mécanique et biologique d'une ravine peut être réalisé progressivement en 1 à 6 ans, mais il doit concerner tout le bassin dès la première année. La fixation biologique d'une ravine vient consolider les versants et le fond de ravine stabilisé par diffé-

rents types de seuils ; si la chronologie est inversée, les plantes sont emportées avec les terres lors des crues.

3. L'emplacement des seuils doit être choisi avec soin selon l'objectif visé. Si celui-ci est de rehausser le fond de ravine pour que les versants atteignent la pente d'équilibre naturel, il faut choisir un verrou, une gorge étroite où de nombreux seuils légers pourront s'appuyer sur des versants solides.

Si l'objectif est de fixer le maximum de sédiments ou de récupérer des espaces cultivables, il faut choisir les zones à faible pente, les confluents de ravines secondaires, les versants évasés et construire de gros ouvrages-poids qui seront rehaussés progressivement.

4. L'écartement entre les seuils est fonction de la pente du terrain. Le déversoir aval doit être à la même altitude que la base du seuil amont, à la pente de compensation près (1 à 10 % selon la nature du fond de ravine) qui peut s'observer sur place (zone stable sans creusement ni sédimentation). Dans un premier temps, cet écartement peut être doublé, en construisant des seuils intermédiaires dès que la première génération de seuil est comblée de sédiments.
5. Stabiliser immédiatement les sédiments piégés avec des plantes basses dans l'axe d'écoulement et des arbres sur les versants. Pour éviter la pression hydrostatique des coulées, il vaut mieux drainer les seuils (grillage, chicanes ou pierres libres).
6. Les seuils doivent être ancrés dans le fond et les flancs de ravine (tranchée de fondation) pour éviter les renards et contournements. Au contact entre le sol limono-argileux et les pierres des seuils, il faut prévoir une couche filtrante de sable et de gravier pour éviter que les sous-pressions n'entraînent les particules fines et la formation de renards.
7. Le courant d'eau doit être bien centré dans l'axe de la ravine par les ailes du seuil, plus élevées que le déversoir central. Ce déversoir doit être renforcé par de grosses pierres plates cimentées ou par des ferrailles pour résister à la force d'arrachement des sables, galets et roches qui dévalent à vive allure au fond des ravines.
8. L'énergie de chute de l'eau qui saute du déversoir doit être amortie par une bavette (enrochement, petit gabion, grillage, touffes d'herbes) ou par un contre-barrage (cuvette d'eau) pour éviter les renards sous le seuil ou le basculement du seuil.
9. Tenir le bétail à l'écart de l'aménagement : il aurait vite fait de détruire les seuils et de dégrader la végétation. En compensation, on peut permettre des prélèvements de fruits, de fourrages et plus tard de bois, en échange de l'entretien de l'aménagement.
10. L'aménagement mécanique n'est terminé que quand on a éteint les sources de sédiments, stabilisé les têtes de ravine et les versants. La végétalisation doit alors se faire naturellement si on a atteint la pente d'équilibre, mais on peut aider la nature en couvrant rapide-

ment les sédiments (herbe) et en les fixant à l'aide d'arbres choisis pour leurs aptitudes écologiques et leur production. Il faut passer de la simple gestion des sédiments à la valorisation des aménagements.

Conclusion générale

L'équation universelle révisée de pertes de sols (RUSLE) est un modèle empirique simple et robuste pour estimer les pertes de sol imputables à l'érosion hydrique. Initialement prévu pour des études à l'échelle parcellaire dans des climats tempérés, il a rapidement gagné en popularité et été étendu à de plus grandes échelles et à d'autres latitudes.

Le présent travail de thèse exploite la méthode RUSLE dans deux contextes géophysiques très différents. Le bassin versant de l'oued El Abid, situé dans les altitudes du Haut Atlas, est soumis à un régime de pluie semi-aride. Cependant, les reliefs très accidentés, des sols peu évolués et favorisant le ruissellement, associé à un couvert végétal dégradé, en font une zone particulièrement sensible à l'érosion hydrique. L'ancienne région Nord Pas-de-Calais, soumise à un climat océanique, est plus arrosée. Mais à l'inverse, son relief est particulièrement plat. Aussi, à la différence de la zone marocaine, la couverture des sols y est majoritairement anthropique, et plus précisément agricole. Ainsi, les sols limoneux laissés nus après la récolte peuvent aussi subir un aléa érosif important, entraînant des pertes en productivité voire des coulées boueuses dans les pires des cas.

Les résultats du modèle pour les deux zones reflètent ces contrastes : le taux d'érosion moyen pour le bassin versant de l'oued El Abid s'élève à 14 t/ha/an, contre 1,4 pour le Nord de la France. Les pertes globales du premier sont principalement produites sur les pentes des hauts reliefs, 72 % des pertes étant concentrées sur 15 % du territoire, avec des taux annuels dépassant les 20 t/ha. Les pertes globales du second sont quant à elles plutôt le résultat d'une érosion de fond, omniprésente mais à faible intensité. Ainsi, 50 % des pertes sont produites par 87 % du territoire, caractérisés par des taux inférieurs à 3,5 t/ha/an.

Une comparaison normalisée des facteurs de l'érosion du modèle RUSLE montre que ces différences sont principalement dues à l'influence de la pente. Ce paramètre, en plus d'une couverture globalement très peu protectrice, conduit à une surproduction de pertes en sols dans le Haut Atlas, dans un contexte pourtant peu soumis à l'action érosive des pluies. En Nord Pas-de-Calais, l'énergie des pluies est bien supérieure, la couverture des sols relativement peu protectrice (couvert forestier et herbager réduit, assolements de type grandes cultures), mais l'absence de relief assure des pertes modérées.

En outre, l'étude sur le Nord Pas-de-Calais, grâce à des données précises sur les types d'assolements, est enrichie d'une approche saisonnière des taux d'érosion, montrant que la majorité des pertes (presque la moitié du total annuel) se situent à l'automne, après moisson, quand les sols sont nus. Une telle approche permet par ailleurs de simuler l'impact d'une pratique anti-érosive simple : le maintien d'un couvert hivernal sur les cultures de printemps, réduisant dans ce cas d'un peu plus d'un tiers les pertes en sol à l'échelle de la région.

L'application de RUSLE dans le Haut Atlas met également au jour certaines limites du modèle. En particulier, l'expression du facteur LS n'est pas conçue pour des pentes extrêmes, aboutissant localement à une surestimation des pertes. D'autre part, la part des précipitations nivales ainsi que l'action protectrice saisonnière du manteau neigeux en haute altitude sont difficiles à prendre en compte en l'absence de stations nivométriques. Il en va de même pour la fonte des neiges, produisant une énergie érosive supplémentaire à celle des pluies.

Ainsi, bien que les précipitations et le ruissellement constituent les causes fondamentales de l'érosion hydrique, l'influence des autres facteurs (pente, nature du sol, pluie, couverture végétale, actions anthropiques) et leur pondération dans l'estimation des pertes en sols sont éminemment dépendante du contexte, ainsi que de l'échelle spatiale (parcelles expérimentales, bassins versants, territoire national) et temporelle (saisonnalité des pluies et des couverts végétaux) de l'étude.

Bibliographie

- [1] Y. Le Bissonnais, H. Benkhadra, V. Chaplot, D. Fox, D. King et J. Daroussin, «Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments,» *Soil & Tillage Research*, vol. 46, pp. 69-80, 1998.
- [2] J. Boardman et J. Poesen, *Soil erosion in Europe: Major processes, causes and consequences*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [3] A. L. Borges, «Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud,» Université Joseph Fourier, Grenoble I, 1993.
- [4] G. Lacroix, K. Ruddick, N. Gypens et C. Lancelot, «Modelling the relative impact of rivers (Scheldt/Rhine/Seine) and Western Channel waters on the nutrient and diatoms/Phaeocystis distributions in Belgian waters (Southern North Sea),» *Continental Shelf Research*, vol. 27, n°110-11, pp. 1422-1446, 2007.
- [5] F. Fournier, *Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques*, Paris: Presses universitaires de France, 1960.
- [6] Y. Le Bissonnais, J. Thorette, C. Bardet et J. Daroussin, *L'érosion hydrique des sols en France*, Orlean: IFEN/INRA, 2002.
- [7] O. Evrard, *Traçage spatio-temporel des sédiments fins et des polluants associés des bassins cultivés de l'amont jusqu'aux grands fleuves : Apport des isotopes radioactifs*, Paris: Université Paris-Sud, 2014.
- [8] O. Cerdan, G. Govers, Y. Le Bissonnais, K. Van Oost, J. Poesen, N. Saby, A. Gobin, A. Vacca, J. Quinton, K. Auerswald, A. Klik, F. J. P. M. Kwaad, D. Raclot, I. Ionita, J. Rejman, S. Rousseva, T. Muxart, M. J. Roxo et T. Dostál, «Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data,» *Geomorphology*, vol. 122, n°11-2, pp. 167-177, 2010.
- [9] MAEF, «Programme d'action national de lutte contre la désertification,» Ministère de l'agriculture, du développement rural et des eaux et forêts, Rabat, 2001.
- [10] S. Maimouni, A. Bannari, A. El-Harti et A. El-Ghmari, «Potentiels et limites des indices spectraux pour caractériser la dégradation des sols en milieu semi-aride,» *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 37, n°13, 2011.
- [11] Intergovernmental Technical Panel on Soils, «Status of the World's soil resources,» Foods and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2015.
- [12] T. Merzouki, «Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains,» *Revue Marocaine du Génie Civil*, vol. 38, pp. 46-50, 1992.
- [13] A.-V. Auzet, *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grandes cultures : aspects agronomiques*, Paris: Ministère de l'environnement/Ministère de l'agriculture, 1987.
- [14] A.-V. Auzet, J. Boiffin, F. Papy, J. Maucorps et J.-F. Ouvry, «An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the Northern Paris Basin, France,» chez *Soil Erosion on Agricultural Land*, Chischester, John Wiley & Sons, Ltd, 1990, pp. 383-400.

-
- [15] S. Wicherek, *Farm land erosion in temperate plains environments and hills*, Amsterdam: Elsevier, 1993.
- [16] C. Duvert, N. Gratiot, O. Evrard, O. Navratil, J. Némery, C. Prat et M. Esteves, «Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments of the Mexican Central Highlands,» *Geomorphology*, vol. 123, n°13-4, pp. 253-256, 2010.
- [17] L. Dhman, A. Merzouk, M. Sabir et I. Fenjiro, «Cartographie des pertes en terre dues à l'érosion hydrique par utilisation d'un système d'information géographique et des images satellites : Cas du bassin versant de Telata,» Marrakech, 1997.
- [18] D. Baize et M.-C. Girard, *Référentiel pédologique 2008*, Versailles: Quae (Savoir Faire), 2009.
- [19] D. King et Y. Le Bissonnais, «Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eau. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe,» *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 78, n°16, pp. 91-105, 1992.
- [20] S. Dautrebande, H. Cordonnier, M. Thirion et C. Biielders, «Les livrets de l'agriculture n°12 : Lutter contre l'érosion des terres,» Ministère de la Région wallonne - Direction générale de l'Agriculture, Namur, 2006.
- [21] W. D. Ellison, «Studies of raindrop erosion,» *Agricultural Engineering*, vol. 25, pp. 131-136, 1944.
- [22] P. C. Eckern, «Raindrop impact as the force initiating soil erosion,» *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 15, pp. 7-10, 1950.
- [23] J. Boiffin, *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*, Grignon: Institut National Agronomique Paris Grignon, 1984.
- [24] C. W. Rose, «Developments in soil erosion and deposition models,» *Advances in Soil Science*, vol. 2, pp. 1-63, 1985.
- [25] P. P. Sharma, «Interrill erosion,» chez *Soil erosion, conservation and rehabilitation*, M. Agassi, Éd., New York, Dekker, 1996, pp. 125-152.
- [26] S. Leguëdois, *Mécanisme de l'érosion diffuse des sols : modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés*, Orléans: Université d'Orléans, 2003.
- [27] A. Cheggour, V. Simonneaux, S. Asma, Y. Yaro, E. Sadik, M. Sabir et I. Benali, «Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion par simulations de pluies sur les principaux sols du bassin versant du Rheraya (Haut Atlas occidental, Maroc),» *Journal of Water Science*, vol. 21, n°13, pp. 311-322, 2008.
- [28] S. Leguëdois, O. Planchon, C. Legout et Y. Le Bissonnais, «Splash projection distance for aggregated soils: Theory and experiment,» *Soils Science Society of America Journal*, vol. 69, n°11, pp. 30-37, 2005.
- [29] A. Lafforgue, «Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles : Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées,» *Cahiers ORSTOM*, vol. 14, n°14, pp. 299-344, 1977.
- [30] R. E. Horton, «The role of infiltration in the hydrologic cycle,» *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 14, n°11, pp. 446-460, 1933.
- [31] Y. Le Bissonnais, V. Lecomte et O. Cerdan, «Grass strip effects on runoff and soil loss,» *Agronomie*, vol. 24, n°13, pp. 129-136, 2004.

- [32] L. Cyr, F. Bonn et A. Pesant, «Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion,» *Ecological Modelling*, vol. 79, n°11-3, pp. 277-285, 1995.
- [33] H. Anys, F. Bonn et A. Merzouk, «Remote sensing and GIS based mapping and modeling of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco,» *Geocarto International*, vol. 9, n°11, pp. 31-40, 1994.
- [34] J. Al Karkouri, A. Laouina, I. Benali et M. Sabir, «Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Béni Boufrah - Rif Central (Maroc),» *Bulletin - Réseau Erosion*, vol. 20, pp. 342-356, 2000.
- [35] M. Sabir, B. Barthes et E. Roose, «Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc),» *Sécheresse*, vol. 15, n°11, pp. 105-110, 2004.
- [36] R. Giménez et G. Govers, «Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds,» *Soil Science Society of America Journal*, vol. 66, n°15, pp. 1475-1483, 2002.
- [37] M. S. Yalin et E. Karahan, «Inception of sediment transport,» *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 105, n°111, 1979.
- [38] P. Y. Julien, *Erosion and Sedimentation*, Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [39] V. Lecomte, *Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant*, Nancy: Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 1999.
- [40] F. Hjulström, «Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris,» *Bulletin of the Geological Institute of Uppsala*, vol. 25, pp. 221-527, 1935.
- [41] W. H. Wischmeier et D. D. Smith, *Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning*, Agriculture Handbook n°537 éd., Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1978.
- [42] R. Bou Kheir, M.-C. Girard, A. Shaban, M. Khawlie, G. Faour et T. Darwich, «Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban,» *Télédétection*, vol. 2, n°12, pp. 79-90, 2001.
- [43] R. Lal, «Soil degradation by erosion,» *Land Degradation & Development*, vol. 12, n°16, pp. 519-539, 2001.
- [44] A. Vrieling, «Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review,» *Catena*, vol. 65, n°11, pp. 2-18, 2006.
- [45] E. Roose, M. Arabi, K. Brahamia, R. Chebbani, M. Mazour et B. Morsli, «Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne - Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion,» *Cahiers ORSTOM*, vol. 28, n°12, pp. 289-308, 1993.
- [46] H. T. Riezebos et G. F. Epema, «Drop shape and erosivity part II: Splash detachment, transport and erosivity indices,» *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 10, n°11, pp. 69-74, 1985.
- [47] C. Salles, J. Poesen et G. Govers, «Statistical and physical analysis of soil detachment by raindrop impact: Rain erosivity indices and threshold energy,» *Water Resources Research*, vol. 36, n°19, pp. 2721-2729, 2000.

-
- [48] G. Erpul, L. D. Norton et D. Gabriels, «Raindrop-induced and wind-driven soil particle transport,» *Catena*, vol. 47, pp. 227-243, 2002.
- [49] V. Chaplot et Y. Le Bissonnais, «Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes,» *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 25, n°12, pp. 145-153, 2000.
- [50] V. P. D'Souza et R. P. Morgan, «A laboratory study of the effect of slope steepness and curvature on soil erosion,» *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 21, n°11, pp. 21-31, 1976.
- [51] D. Haboudane, F. Bonn, A. Royer, S. Sommer et W. Mehl, «Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally-based information and digital geomorphometric attributes,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n°118, pp. 3795-3820, 2002.
- [52] E. Roose et M. Sabir, «Stratégies traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans le bassin méditerranéen : classification en vue d'un usage renouvelé,» *Bulletin - Réseau Erosion*, vol. 21, pp. 33-44, 2002.
- [53] L. de Franchis et F. Ibanez, Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens. Etude bibliographique, Sophia Antipolis: Plan Bleu, 2003.
- [54] R. Neboit-Guilhot, «Autour d'un concept d'érosion accélérée : l'homme, le temps et la morphogénèse,» *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 5, n°12, pp. 159-172, 1999.
- [55] R. Lahmar et A. Ruellan, «Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée : la pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable,» *Cahiers Agricultures*, vol. 16, n°14, pp. 318-323, 2007.
- [56] P. Finke, R. Hartwich, R. Dudal, J. J. Ibáñez, M. Jamagne, D. King, L. Montanarella et N. Yassoglou, Georeferenced soil database for Europe. Manual of Procedures version 1.1, Luxembourg: European Soil Bureau, 2001.
- [57] Y. Mohsine, Application du magnétisme de l'environnement pour la caractérisation de l'état d'évolution et/ou de dégradation des sols : Application aux sous bassins versants de Mezguida et Ait Azzouz de Bouregreg, Rabat: Université Mohammed V, 2009.
- [58] G. Aubert et J. Boulaïne, La pédologie, Paris: Presses Universitaires de France, 1972.
- [59] J. Poesen, F. Ingelmo-Sanchez et H. Mucher, «The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer,» *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 15, n°17, pp. 652-671, 1990.
- [60] M. Chikhaoui, F. Bonn, A. I. Bokoye et A. Merzouk, «A spectral index for land degradation mapping using ASTER data: Application to a semi-arid Mediterranean catchment,» *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 7, n°12, pp. 140-153, 2005.
- [61] D. H. Yaalon, «Soils in the Mediterranean region: What makes them different?,» *Catena*, vol. 28, n°13-4, pp. 157-169, 1997.
- [62] J. Roberts, R. Jepsen, D. Gotthard et W. Lick, «Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles,» *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 124, n°112, pp. 1261-1267, 1998.
- [63] E. Roose, Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) (Bulletin Pédologique de la FAO n°70), Rome: Foods and Agriculture Organization of the United Nations,

- 1994.
- [64] M. Derruau, Précis de géomorphologie, Paris: Masson, 1988.
- [65] E. Roose et G. De Noni, «Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives,» *Sécheresse*, vol. 15, n°11, pp. 121-129, 2004.
- [66] J. de Pina Tavares, Erosion des sols au Cap Vert : Etude des processus et quantification à l'échelle de trois bassins versants de l'île de Santiago, Dijon: Université de Bourgogne, 2010.
- [67] L. Mabit, M. R. Laverdière et C. Bernard, «L'érosion hydrique : méthodes et études de cas dans le Nord de la France,» *Cahiers Agricultures*, vol. 11, n°13, pp. 195-206, 2002.
- [68] G. De Noni, M. Viennot, J. Asseline et G. Trujillo, Terres d'altitude, terres de risque - La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes, Latitudes 23 éd., Paris: IRD Editions, 2001.
- [69] J. Albergel, Y. Pépin, S. Nasri et M. Boufaroua, «Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens,» chez *Hydrology of the Mediterranean and semiarid regions*, Montpellier, IAHS Publication n°278, 2003, pp. 373-379.
- [70] M. Sabir, L'érosion hydrique et sa quantification, Orsay: Université de Paris 11, 1987.
- [71] G. I. Metternicht et J. A. Zinck, «Evaluating the information content of JERS-1 SAR and Landsat TM data for discrimination of soil erosion features,» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 53, n°13, pp. 143-153, 1998.
- [72] J. M. van der Knijff, R. J. A. Jones et L. Montanarella, «Soil erosion risk assessment in Europe,» Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2000.
- [73] S. K. Jain, P. Singh et S. M. Seth, «Assessment of sedimentation in Bhakra Reservoir in the western Himalayan region using remote sensed data,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 47, n°12, pp. 203-212, 2002.
- [74] B. Engel, «Estimating soil erosion using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) using ArcView,» Department of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University, West Lafayette, 2003.
- [75] A. Sadiki, S. Bouhlassa, J. Auajjar, A. Faleh et J. Macaire, «Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : Cas du bassin versant de l'oued Boussouab,» *Bulletin de l'Institut Scientifique*, vol. 26, pp. 69-79, 2004.
- [76] O. E. Shbeli, «GIS applications for erosion risk assessment and land classifications North-West Libya,» chez *Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique*, Rabat, 2005.
- [77] J. Abaoui, A. El Ghmari, A. El Harti, E. M. Bachaoui, A. Bannari et A. El Bouadili, «Cartographie de l'érosion hydrique en zone montagneuse : cas du bassin versant des Ait Bou Goumez, Haut Atlas, Maroc,» *Estudios Geológicos*, vol. 61, n°11, pp. 33-39, 2005.
- [78] C. King, N. Baghdadi, V. Lecomte et O. Cerdan, «The application of remote-sensing data to monitoring and modelling of soil erosion,» *Catena*, vol. 62, n°12-3, pp. 79-93, 2005.
- [79] B. Bachaoui, E. M. Bachaoui, A. El Harti, A. Bannari et A. El Ghmari, «Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique : exemple du Haut Atlas marocain,» *Télédétection*, vol. 7, n°11-4, pp. 393-404, 2007.

-
- [80] B. Ustun, «Soil erosion modelling by using GIS and remote sensing : a case study, Ganos mountain,» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, pp. 1681-1683, 2008.
- [81] O. Terranova, L. Antronico, R. Coscarelli et P. Iaquina, «Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy),» *Geomorphology*, vol. 112, n°13-4, pp. 228-245, 2009.
- [82] M. Rejaur Rahman, Z. H. Shi et C. Chongfa, «Soil erosion hazard evaluation - An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies,» *Ecological Modelling*, vol. 220, n°113-14, pp. 1724-1734, 2009.
- [83] R. Bou Kheir, M. H. Greve, P. K. Bøcher, M. B. Greve, R. Larsen et K. McCloy, «Predictive mapping of soil organic carbon in wet cultivated lands using classification-tree based models: The case study of Denmark,» *Journal of Environmental Management*, vol. 91, pp. 1150-1160, 2010.
- [84] R. Escadafal, «Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters: Examples from arid regions,» chez *Imaging spectrometry - A tool for environmental observations*, J. Hill et J. Mégier, Éd., Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994, pp. 71-87.
- [85] N. M. Mattikalli, «Soil colour modelling for the visible and near infrared bands of Landsat sensors using laboratory spectral measurements,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, pp. 14-28, 1997.
- [86] R. Mathieu et M. Pouget, «Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil colour of an arid environment,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, pp. 17-28, 1998.
- [87] S. Maimouni, A. Bannari, A. El Harti et A. El Ghmari, «Indices spectraux et "spectral angle mapper" pour la cartographie des risques d'érosion hydrique à partir des données ALI EO-1,» *Téledétection*, vol. 10, n°14, pp. 213-223, 2012.
- [88] J. Hill, S. Sommer, W. Mehl et J. Megier, «Use of earth observation satellite data for land degradation mapping and monitoring in Mediterranean ecosystems: Towards a satellite-observatory,» *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 37, n°11-3, pp. 143-158, 1995.
- [89] D. Haboudane, J. R. Miller, N. Tremblay, P. J. Zarco-Tejada et L. Dextraze, «Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, n°12, pp. 416-426, 2002.
- [90] M. Chikhaoui, F. Bonn, A. Merzouk, B. Lacaze et A. M. Mejjati, «Cartographie de la dégradation des sols à l'aide des approches du spectral angle mapper et des indices spectraux en utilisant des données Aster,» *Téledétection*, vol. 7, n°11-4, pp. 343-357, 2007.
- [91] N. Inoubli, Ruissellement et érosion hydrique en milieu méditerranéen vertique : approche expérimentale et modélisation, Montpellier: Montpellier SupAgro, 2016.
- [92] K. Playford, J. Toole et I. Adsley, Radioactive fallout in air and rain: results to the end of 1991, Harwell: AEA Consultancy Services, 1993.
- [93] D. E. Walling, «The sediment delivery problem,» *Journal of Hydrology*, vol. 65, n°11-3, pp. 209-237, 1983.

- [94] A. Nouira, E. H. Sayouty et M. Benmansour, «Use of ^{137}Cs technique for soil erosion study in the agricultural region of Casablanca in Morocco,» *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 68, n°11, pp. 11-26, 2003.
- [95] M. Benmansour, L. Mabit, A. Nouira, R. Moussadek, H. Bouksirate, M. Duchemin et A. Benkdad, «Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb ,» *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 115, pp. 97-106, 2013.
- [96] A. L. Collins, D. E. Walling, H. M. Sickingabula et G. J. L. Leeks, «Using ^{137}Cs measurements to quantify soil erosion and redistribution rates for areas under different land use in the Upper Kaleya River basin, southern Zambia,» *Geoderma*, vol. 104, pp. 299-323, 2001.
- [97] M. A. Nearing, L. J. Lane et V. L. Lopes, «Modeling Soil Erosion,» chez *Soil Erosion Research Methods*, R. Lal, Éd., Boca Raton, Routledge, 1994.
- [98] C. A. Onstad et G. R. Foster, «Erosion modeling on a watershed,» *Transactions of the ASAE*, vol. 18, n°12, pp. 288-292, 1975.
- [99] J. R. Williams, «Sediment routing for agricultural watersheds,» *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 11, n°15, pp. 965-974, 1975.
- [100] W. Flacke, K. Auerswald et L. Neufang, «Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash,» *Catena*, vol. 17, n°14-5, pp. 383-397, 1990.
- [101] K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool et D. C. Yoder, Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agriculture Handbook n°703 éd., Tucson: USDA, 1997.
- [102] A. N. Strahler, «Dynamic basis of geomorphology,» *GSA Bulletin*, vol. 63, n°19, pp. 923-938, 1952.
- [103] O. Aboulabbes, «Etudes de diagnostic en hydrogéologie du SIBE de Tamga,» Projet de Gestion des Aires protégées, Rabat, 2004.
- [104] R. Bisour, «Ressources en eau de l'oued El Abid amont barrage Bin El Ouidane et agriculture irriguée : Caractérisation, quantification et valorisation,» Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, 2019.
- [105] J. Gréco, «L'érosion, la défense et l'érosion des sols et le reboisement en Algérie,» Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, Alger, 1966.
- [106] J. Beckelynck et J. P. Kleszcz, «Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution Région Nord-Pas-de-Calais,» BRGM, Orléans, 1981.
- [107] F. Al Zitawi, «Using RUSLE in prediction of soil loss for selected sites in North and North West of Jordan,» Jordan University of Science and Technology, Irbid, 2006.
- [108] M. Kouli, P. Soupios et F. Vallianatos, «Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwester Crete, Greece,» *Environmental Geology*, vol. 57, n°13, pp. 483-497, 2008.
- [109] K. Khemiri et S. Jebari, «Evaluation de l'érosion hydrique dans les bassins versants de la zone semi-aride tunisienne avec les modèles RUSLE et MUSLE couplés à un système d'information géographique,»

- [110] M. Meliho, A. Khattabi, N. Mhammdi et Z. Hongming, «Cartographie des risques de l'érosion hydrique par l'équation universelle révisée des pertes en sols, la télédétection et les SIG dans le bassin versant de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc),» *European Scientific Journal*, vol. 12, n°132, pp. 277-297, 2016.
- [111] F. Hara, M. Achab, A. Emran et G. Mahe, «Study of soil erosion risks using RUSLE model and remote sensing: case of the Bouregreg watershed (Morocco),» *Proceedings of IAHS*, vol. 383, pp. 159-162, 2020.
- [112] M. Manaouch, A. Zouagui et I. Fenjiro, «A review of soil erosion modeling by R/USLE in Morocco: Achievements and limits,» *E3S Web of Conferences*, vol. 234, 2021.
- [113] H. M. J. Arnoldus, «An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation,» chez *Assessment of Erosion*, M. de Boodt et D. Gabriels, Éds., Chichester, John Wiley and Sons, Ltd, 1980, pp. 127-132.
- [114] P. Panagos, C. Ballabio, P. Borrelli, K. Meusburger, A. Klik, S. Rousseva, M. P. Tadić, S. Michaelides, M. Hrabalíková, P. Olsen, J. Aalto, M. Lakatos, A. Rymaszewicz, A. Dumitrescu, S. Begueria et C. Alewell, «Rainfall erosivity in Europe,» *Science of the Total Environment*, vol. 511, pp. 801-814, 2015.
- [115] R. P. Stone et D. Hilborn, «Universal Soil Loss Equation: Factsheet,» Ontario's Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Guelph, 2000.
- [116] P. Panagos, K. Meusburger, C. Ballabio, P. Borrelli et C. Alewell, «Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS,» *Science of the Total Environment*, Vols. 479-480, pp. 189-200, 2014.
- [117] T. Sterckeman, F. Douay, D. Baize, H. Fourrier, N. Proix et C. Schwartz, «Référentiel pédo-géochimique du Nord-Pas-de-Calais : Méthode et principaux résultats,» *Etude et Gestion des Sols*, vol. 14, n°12, pp. 153-168, 2007.
- [118] AFES, Référentiel pédologique, Peillac: Quae, 2008.
- [119] H. Mitasova, J. Hofierka, M. Zlocha et L. R. Iverson, «Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS,» *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 10, n°15, pp. 629-641, 1996.
- [120] P. Panagos, P. Borrelli et K. Meusburger, «A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water,» *Geosciences*, vol. 5, n°12, pp. 117-126, 2015.
- [121] P. J. J. Desmet et G. Govers, «A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units,» *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 51, n°15, pp. 427-433, 1996.
- [122] N. Geddes et D. Dunkerley, «The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and of gravity drops released from desert shrubs,» *Catena*, vol. 36, n°14, pp. 303-313, 1999.
- [123] B. Ludwig, «Les déterminants agricoles du ruissellement et de l'érosion - De la parcelle au bassin versant,» *Ingénieries*, vol. 22, pp. 37-47, 2000.
- [124] C. O'Loughlin et X. B. Zhang, «The influence of fast-growing conifer plantations on shallow landsliding and earthflow movement in New Zealand steeplands,» *IUFRO Yugoslavia*, vol. 1, pp. 217-226, 1986.

- [125] W. H. Wischmeier et D. D. Smith, Prediction rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains: A guide for selection of practices for soil and water conservation, Agriculture Handbook n°282 éd., Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1965.
- [126] E. Roose et R. Bertrand, «Contribution à l'étude des méthodes des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest : résultats expérimentaux et observations sur le terrain,» *Agronomie Tropicale*, vol. 26, n°111, pp. 1270-1283, 1971.
- [127] W. H. Wischmeier, D. D. Smith et R. E. Umland, «Evaluation of factors in the soil loss equation,» *Agricultural Engineering*, vol. 39, pp. 458-462, 1958.
- [128] E. Roose, Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire : contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical, Abidjan: ORSTOM, 1973.
- [129] A. C. Millington et J. R. G. Townshend, «Remote sensing applications in African erosion and sedimentation studies,» *Proceedings of the IAHS Harare Symposium*, vol. 144, pp. 373-384, 1984.
- [130] B. Heusch, «L'érosion du pré-rif : une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-rif occidental,» Station de Recherches Forestières de Rabat, Rabat, 1970.
- [131] D. Diallo, «Erosion des sols en zone soudanienne du Mali - Transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut Niger),» Université Joseph Fourier, Grenoble, 2000.
- [132] J. Naslhaj, «Evaluation de l'érosion des sols et proposition d'aménagement du bassin versant à l'aval du barrage de Hassan II, Haute Moulouya, Maroc,» Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, 2009.
- [133] G. Pajot, «Etude des sols du Pré-Rif,» Institut National de Recherche Agricole, Rabat, 1963.
- [134] S. Schmidt, C. Alewell et K. Meusburger, «Mapping spatio-temporal dynamics of the cover and management factor (C-factor) for grasslands in Switzerland,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 211, pp. 89-104, 2018.
- [135] G. J. Wall, D. R. Coote, E. A. Pringle et I. J. Shelton, «Equation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada : Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada,» Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, 2022.
- [136] C. Bielders, N. Feltz, H. Cordonnier, A. Maignard, A. Degré et M.-F. Destain, «Convention GISER (Gestion Intégrée Sol Erosion Ruissellement): rapport final,» Université Catholique de Louvain, Ottignies-Louvain-la-Neuve, 2011.
- [137] B. Lastoria, F. Miserocchi, A. Lanciani et G. Monacelli, «An estimated erosion map for the Aterno-Pescara river basin,» *European Water*, vol. 21, pp. 29-39, 2008.

Annexes

Annexe 1 : Différents types de couvert végétal dans le Haut Atlas



Photo 26 : Couverture végétale herbacée



Photo 27 : Couvert végétal dense dans le bassin versant



Photo 28 : Couvert végétal éparse dans le bassin versant



Photo 29 : Couvert végétal dégradé dans le bassin versant



Photo 30 : Couvert végétal très dégradé dans le bassin versant



Photo 31 : Terrain dénudé suite au processus érosif

Annexe 2 : Différents aspects du processus de l'érosion hydrique dans le BV El Abid



Photo 32 : Effet du ruissellement et de l'érosion hydrique



Photo 33 : Effet splash sur les sols nu et formation de la couche de battance



Photo 34 : Effet protecteur de la végétation sur les sols

Annexe 3 : Envasement du barrage Bin El Ouidane



Photo 35 : Sédiments emportés par l'oued El Abid

Annexe 4 : Affleurement des formations géologiques dans le BV El Abid



Photo 36 : Affleurement des couches géologiques (roche mère)



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE

Faculté des Sciences et Techniques

Béni-Mellal

Wafae Nouaim

*Etude de l'applicabilité du modèle d'érosion
hydrique RUSLE à deux contextes hétéroclites :
Le Haut Atlas Central marocain et
de la région française Nord-Pas-De-Calais*

La présente étude s'attache à cartographier et à quantifier les pertes en sols dans deux contextes différents (climatique, topographique, pédologique et agronomique), le bassin versant de l'oued El Abid (Haut-Atlas, Maroc) à l'amont du barrage Bin El-Ouidane d'une part et l'ancienne région Nord-Pas-de-Calais (France) d'autre part, à l'aide d'une méthode commune : l'équation universelle révisée de pertes de sols (RUSLE).

Les résultats obtenus pour le bassin versant de l'oued El Abid aboutissent à un taux d'érosion moyen de 14 t/ha/an, avec 72 % des pertes concentrées sur 21 % de la superficie totale, principalement les hauts reliefs montagneux caractérisés par des taux supérieurs à 20 t/ha/an. Le reste de la superficie (soit 85 %) délivre quant à elle seulement 28 % des pertes en sol. Cette superficie correspond aux plateaux et dépressions.

Dans le Nord-Pas-de-Calais, le taux d'érosion moyen calculé avoisine les 1,3 t/h/an, surtout en raison d'un relief peu prononcé. Cependant, l'érosion des sols peut être un problème localement, en particulier dans un contexte de grandes cultures, avec des taux atteignant 54 t/ha/an dans les zones les plus à risque (collines de l'Artois et des Flandres, au relief plus marqué). Des données précises sur les pratiques agricoles (assolements, couverts intermédiaires) et sur les précipitations ont permis d'effectuer une discrétisation intra-annuelle (saisonnière) de l'érosion, afin, notamment, de prendre en compte le rythme asynchrone des facteurs.

Cette étude croisée de deux zones soumises à des régimes d'érosion très différents aboutit nécessairement à des conclusions qui le sont tout autant. Dans le Nord Pas-de-Calais, l'assolement et les pratiques agricoles au sens large représentent le cœur de cible des actions anti-érosives. Dans le Haut Atlas, les sols sont naturellement soumis à un fort aléa érosif et l'activité humaine y est peu répandue. Les actions se concentrent donc sur le reboisement et le contrôle des activités pastorales (surpâturage).

Keywords : Erosion hydrique, RUSLE, oued El Abid, Haut Atlas central, Maroc, Nord-Pas-de-Calais, France