



HAL
open science

**Caractérisation des taux d'érosion et de croissance de la
végétation dans le bassin versant du Laval et
identification des facteurs de contrôle à l'échelle locale
entre 2015 et 2021 (Observatoire Draix-Bléone, Sud-Est
de la France)**

Juliette Pellerano

► **To cite this version:**

Juliette Pellerano. Caractérisation des taux d'érosion et de croissance de la végétation dans le bassin versant du Laval et identification des facteurs de contrôle à l'échelle locale entre 2015 et 2021 (Observatoire Draix-Bléone, Sud-Est de la France). *Géographie*. 2024. dumas-04693337

HAL Id: dumas-04693337

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04693337v1>

Submitted on 10 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MASTER Domaines : SHS et STS

Mention : GAED (Géographie, Aménagement, Environnement, Développement)

Parcours GÉOÏDES (Géographie, Information, Interface, Durabilité, EnvironnementS)

Caractérisation des taux d'érosion et de croissance de la végétation dans le bassin versant du Laval et identification des facteurs de contrôle à l'échelle locale entre 2015 et 2021 (Observatoire Draix-Bléone, Sud-Est de la France)



Maître de stage : Caroline Le Bouteiller, Univ. Grenoble Alpes, INRAE, IGE

Mémoire soutenu le 2 juillet 2024 par :

Juliette PELLERANO

Devant un jury constitué de :

Jessica Pic, Univ. Grenoble Alpes, IUGA

Directrice de mémoire/Examinatrice

Sylvain Bigot, Univ. Grenoble Alpes, IUGA

Examineur

Abstract

Marl badlands are areas characterised by a dissected topography, highly susceptible to erosion and with little or no vegetation cover. Since 1983, six catchment areas have been instrumented and studied in the Mediterranean Alps (0.001 to 22 km²). Erosion rates at the outlets of these catchments are very high, and can reach 16,000 t/km²/year for the Laval catchment, the most active. The aim of this study, based on the conclusions of a previous internship, was to answer two questions: How will erosion and vegetation growth in the Laval catchment be spatially distributed between 2015 and 2021? What are the controlling factors likely to affect these local erosion and growth rates?

The spatial distribution of erosion between 2015 and 2021 was modelled using a comparison of LiDAR clouds. The map produced shows a maximum ablation of 2.6 metres and a maximum deposition of 2.74 metres, as well as numerous small landslides with a clearly visible ablation/deposition dynamic.

It then appears that, for this catchment, two controlling factors are decisive in responding to the spatial variability of erosion: slope ($\eta^2 = 0.0948$) and vegetation age ($\eta^2 = 0.301$). A generalised linear model was used to confirm this and could be used to predict the spatial distribution of erosion in this catchment in the short term. It would therefore be appropriate to investigate the relationship between erosion and the age of the vegetation using field analyses. In addition, the creation of a model combining temporal variation in erosion and spatial variation could provide a better understanding of the behaviour of the Laval catchment and, on a wider scale, of erosion in the marl badlands.

Tree growth between 2015 and 2021 was modelled using the same clouds. The map shows an overall growth dynamic for vegetation, with maximum growth for deciduous trees (0.84 metres on average). It also confirms that bare soil is being revegetated. Correlation tests showed that neither erosion ($R^2 = -0.05$) nor other factors ($\eta^2 = \text{low}$) influence the spatial distribution of vegetation growth.

Résumé

Les *badlands* marneux sont des zones caractérisées par une topographie disséquée, très sensibles à l'érosion avec peu ou pas de couvert végétal. Depuis 1983, six bassins versants ont été instrumentés et sont étudiés dans les Alpes méditerranéennes (0,001 à 22 km²). Les taux d'érosion à l'exutoire dans ces bassins sont très importants et peuvent atteindre 16 000 t/km²/an pour le bassin versant du Laval, le plus actif. Cette étude, issue des conclusions d'un précédent stage, avait pour objectif de répondre à deux problématiques : *Comment l'érosion et la croissance de la végétation du bassin versant du Laval sont-elles spatialement réparties entre 2015 et 2021 ? Quels sont les facteurs de contrôle susceptibles d'affecter ces taux d'érosion et de croissance locaux ?*

La répartition spatiale de l'érosion entre 2015 et 2021 a été modélisée grâce à une comparaison de nuages LiDAR. La carte produite met en avant une ablation maximale de 2,6 mètres et un dépôt maximal 2,7 mètres ainsi que de nombreux petits glissements avec une dynamique ablation/dépôt bien visible. Il apparaît alors que, pour ce bassin versant, deux facteurs de contrôle sont déterminants pour la répondre à la variabilité spatiale de l'érosion : la pente ($\eta^2 = 0,0948$) et l'âge de la végétation ($\eta^2 = 0,301$). Un modèle linéaire généralisé a permis de confirmer cela et pourra servir à la prédiction de la répartition spatiale de l'érosion dans ce bassin versant à court terme. Il serait donc pertinent de creuser la relation entre l'érosion et l'âge de la végétation par des analyses de terrain. Aussi, la création d'un modèle combiné entre la variation temporelle de l'érosion et la variation spatiale pourrait permettre de comprendre davantage le comportement du bassin versant du Laval et à plus large échelle, l'érosion dans les *badlands* marneux.

La dynamique de croissance des arbres entre 2015 et 2021 a été modélisée grâce à ces mêmes nuages. La carte obtenue permet d'observer une dynamique globale de croissance de la végétation avec une croissance moyenne de 0,52 m et maximale de 0,84 m (feuillus). Une dynamique de revégétalisation des sols nus est aussi confirmée. Les tests de corrélations ont montré que ni l'érosion ($R^2 = -0,05$) ni les autres facteurs ($\eta^2 =$ faible) n'influencent la répartition spatiale de la croissance de la végétation.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Caroline. Tout d'abord pour m'avoir accueillie à INRAE et m'avoir donné l'opportunité de réaliser un stage qui correspond à mes centres d'intérêts. J'ai pu améliorer mes compétences en télédétection et acquérir de nouvelles compétences dans le traitement des données. Je la remercie également pour m'avoir emmenée plusieurs fois sur le terrain, notamment pour la campagne géophysique 2024. Sur le terrain, j'ai appris énormément de choses à ses côtés et cela m'a permis de découvrir en « grandeur nature » ce que j'étudiais sur mon ordinateur et m'a donné de nouvelles idées et pistes pour mes recherches. J'ai aussi pu apprendre de nouvelles manipulations, trempée jusqu'aux os, mais toujours dans la bonne humeur !

Dans un second temps, je tiens également à remercier chaleureusement Jessica Pic, mon encadrante de stage pour son suivi régulier tout le long du stage et ses précieux conseils pour la rédaction et la mise en valeur de ce mémoire.

Je remercie Sylvain Bigot pour être le second membre du jury et avoir pris le temps de lire attentivement mon mémoire. Je le remercie en outre pour nous avoir accompagnés tout au long de notre année de Master 2.

Je remercie aussi mes parents et mes amis pour avoir relu plusieurs fois mon mémoire.

Enfin, je suis reconnaissante des conditions dans lesquelles j'ai pu réaliser ce stage. La présence de nombreux autres stagiaires à INRAE m'a permis de découvrir des personnes aussi passionnées que moi dans d'autres domaines. Je remercie donc tous les autres stagiaires, leur bonne humeur et l'entente générale ont été pour moi une aide précieuse.

Sigles et acronymes

AIC : Critère d'Information d'Akaike

GLM : Modèle Linéaire Généralisé

IGE : Institut des Géosciences de l'Environnement

IGN : Institut National de l'information Géographique et forestière

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

LiDAR: Laser imaging Detection And Ranging

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MES : Matières En Suspension

MSE : Erreur Quadratique Moyenne

ONF : Office National des Forêts

ORE : Observatoire de Recherche en Environnement

OZCAR : Observatoires de la Zone Critique : Applications et Recherche

Sommaire

ABSTRACT	2
REMERCIEMENTS	4
SIGLES ET ACRONYMES	5
SOMMAIRE	6
INTRODUCTION	7
1. CONTEXTE	9
1.1. ETAT DE L'ART	9
1.2. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE : LE BASSIN VERSANT DU LAVAL	17
2. METHODOLOGIE	24
2.1. PRODUCTION DE LA CARTE DE COMPARAISON DES NUAGES.....	24
2.2. RECHERCHE DES FACTEURS DE CONTROLE DE L'EROSION	29
2.3. MODELES LINEAIRES GENERALISES	31
2.4. RECHERCHE D'UNE POTENTIELLE INFLUENCE DES FACTEURS SUR L'EVOLUTION DE LA VEGETATION.....	33
3. RESULTATS	35
3.1. LA CARTE DE L'EROSION SPATIALISEE ENTRE 2015 ET 2021	35
3.2. RECHERCHE DES FACTEURS D'INFLUENCE DE LA VARIATION DE L'EROSION	37
3.3. CONSTRUCTION DE MODELES LINEAIRES GENERALISES POUR LA PREDICTION DE L'EROSION	39
3.4. CARTOGRAPHIE DE LA CROISSANCE DE LA VEGETATION ENTRE 2015 ET 2021	41
3.5. RECHERCHE DES FACTEURS D'INFLUENCE DE LA VARIATION DE LA CROISSANCE DE LA VEGETATION	42
4. DISCUSSION	45
4.1. LIMITES ET APPORTS DE LA METHODOLOGIE LIEE A L'UTILISATION DU LIDAR POUR L'ETUDE DES TAUX D'EROSION 45	
4.2. LE ROLE DES FACTEURS DANS LA VARIATION DE L'EROSION A L'ECHELLE SPATIALE	46
4.3. CROISSANCE DES ARBRES ET FACTEURS D'INFLUENCE A L'ECHELLE SPATIALE	47
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	49
BIBLIOGRAPHIE	51
LISTE DES FIGURES	55
LISTE DES TABLEAUX	56
LISTE DES ANNEXES	57
TABLE DES MATIERES.....	58
ANNEXES	60

Introduction

Les terrains que l'on appelle terres noires (*badlands*) sont des zones avec un faible couvert végétal et sont reconnus pour faire partie des lithologies sensibles à l'érosion (Antoine et al., 1995). Les terres noires marneuses de la région méditerranéenne sont soumises à l'érosion hydrique. Une conjonction entre la péjoration climatique du Petit Age Glaciaire et la pression anthropique entre le 16^{ème} et le 19^{ème} siècle a conduit à la dévégétalisation de ces milieux, fragilisant leur résistance face aux précipitations (Descroix & Olivry, 2002). Dans le cas des terres noires de la Durance, trois facteurs principaux d'érodabilité ont été identifiés : la forte érodabilité de cette lithologie, les caractéristiques du climat méditerranéen et le taux de couvert végétal (Descroix & Olivry, 2002). Ainsi, Delannoy et Rovéra ont estimé en 1996 une érosion moyenne de 1 cm/an pour les marnes Jurassique des Préalpes du Sud. Au total, elles fournissent 40 % du total des flux sédimentaires de la Durance alors qu'elles ne représentent que 1,5 % de son territoire (Copard et al., 2018). Depuis 1983, certains bassins versants ont été instrumentés et étudiés afin de comprendre la réponse morpho dynamique des terres noires face aux aléas climatiques. Ce sont aujourd'hui 6 bassins versants qui constituent l'Observatoire Draix-Bléone et sont gérés par INRAE et l'IGE.

Le stage s'est déroulé entre début mars et fin juillet 2024 à INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement) dans l'unité IGE (Institut des Géosciences pour l'Environnement). L'IGE est une unité mixte de recherche qui n'est pas uniquement sous la tutelle d'INRAE mais également d'autres organismes (CNRS, UGA, Grenoble INP, IRD). En outre, INRAE est un organisme public à caractère scientifique et technologique. Les thématiques d'études principales de cet institut sont le changement climatique et les risques associés, l'agroécologie, la biodiversité, l'alimentation, la bioéconomie et l'étude des sociétés et territoires. Le stage s'est inscrit dans le projet de l'Agence Nationale de la Recherche « CLIMBAD » qui a vocation à étudier les processus d'érosion dans les terres noires (*badlands*) de l'observatoire Draix-Bléone. A l'échelle nationale, ce projet est intégré au réseau français des observatoires de la zone critique OZCAR (Observatoire de la Zone Critique : Application et Recherche).

Mon stage s'inscrit à la suite du stage précédent (De Almeida, 2023) sur les dynamiques de végétation dans les bassins versants de l'observatoire Draix-Bléone depuis les 40 dernières années. L'étudiant précédent a montré que le bassin du Laval s'est revégétalisé naturellement (résineux et surtout des pins noirs) sur des zones dénudées. Il a aussi mis en avant que les aspects topographiques jouent un rôle majeur dans les comportements de colonisation par la végétation. De ce fait, les zones de forte pente ne présentent quasiment pas de dynamique de revégétalisation alors que ce sont les zones les plus productrices de sédiments. Pour l'instant, la revégétalisation naturelle du Laval n'agit pas encore sur les taux d'érosion du fait de la difficulté des essences à s'implanter dans les fortes pentes. Aucune tendance à la diminution des exports sédimentaires n'a été observée, ni de corrélation entre l'érosion et les dynamiques de végétation. A la suite de ce stage, une volonté de creuser cette potentielle relation a été mise en évidence. Pour arriver à étudier cela, une des perspectives proposées pour mon stage était de spatialiser précisément les zones de forte érosion grâce à une analyse diachronique de levés LiDAR dans le bassin versant du Laval. Ainsi, il serait possible de savoir quels facteurs affectent l'érosion locale, si la revégétalisation naturelle a un réel impact ou non sur cette érosion (De Almeida, 2023) et à l'inverse si l'érosion a un impact sur la végétation.

Ce stage répond donc à trois objectifs principaux :

- 1- **Produire une carte détaillée des taux d'érosion en tout point du bassin versant du Laval.** Il s'agira de comparer les nuages de points LiDAR issus d'une campagne menée en 2015 et ceux de la campagne LiDAR HD de l'IGN en 2021, pour produire une carte des épaisseurs érodées sur la période 2015-2021 sur le bassin du Laval.
- 2- **Identifier les facteurs de contrôle de ces taux d'érosion locaux, en lien notamment avec les évolutions récentes de la couverture végétale.** La carte des taux d'érosion est analysée et mise en relation avec les facteurs topographiques et écologiques afin de mettre en évidence les facteurs qui contrôlent ces taux d'érosion. Pour pouvoir mener à bien cette seconde mission, le MNT de 2015 sera utilisé ainsi que les cartes de végétation issues du stage de De Almeida (2023) sur la période 1982-2021.
- 3- **Produire une carte de dynamique de croissance de la végétation entre 2015 et 2021 et identifier les facteurs de contrôle de cette croissance.** Les nuages de points utilisés pour l'objectif 1 sont retravaillés et comparés pour produire une carte de la dynamique de croissance de la végétation dans le bassin versant du Laval. Puis, une recherche de corrélation est effectuée afin de savoir si certains facteurs jouent un rôle dans la variation de la croissance de la végétation à une échelle spatialisée dans le bassin versant du Laval.

Une problématique émerge donc de ces questionnements : *Comment l'érosion et la croissance de la végétation du bassin versant du Laval sont-elles spatialement réparties entre 2015 et 2021 ? Quels sont les facteurs de contrôle susceptibles d'affecter ces taux d'érosion et de croissance locaux ?*

La première partie de ce mémoire présentera l'état de l'art et le secteur d'étude. L'état de l'art a pour objectif de mettre en lumière les différents processus d'érosion dans les sols marneux, leur quantification, les facteurs qui peuvent influencer l'érosion et l'avenir des *badlands* face au changement climatique. En suivra la présentation du secteur d'étude afin de contextualiser l'histoire de ce terrain, ses caractéristiques, sa topographie et son instrumentation.

Dans un second temps, une méthodologie détaillée en deux parties qui correspond à chaque objectif du stage et qui permet de répondre à la problématique sera explicitée.

Enfin, les résultats obtenus seront exposés. Les cartes d'érosions et de croissance seront mises en lumière grâce aux résultats des statistiques réalisées sur les facteurs d'influence de ces deux variables. Ces résultats seront ensuite discutés, mis en perspective avec la bibliographie et permettront d'en expliquer les limites.

1. Contexte

1.1. Etat de l'art

Cet état de l'art a vocation à présenter ce que sont les *badlands* marneux, leur formation et mettre en relation les enjeux autour de ceux-ci. Différents facteurs peuvent affecter cette lithologie face à l'érosion et leur avenir dans un contexte de changement climatique soulève de nombreux questionnements. Pour étudier les changements topographiques de zones montagneuses, plusieurs méthodes de quantification de l'érosion existent et l'utilisation du LiDAR connaît un accroissement ces dernières années.

1.1.1. L'érosion des lithologies marneuses

1.1.1.1. Généralités

L'érosion (*latin rodere*) est définie comme « *le résultat des processus qui détachent et transportent des matériaux sur la surface terrestre* » (Mathys, 2006). L'érosion peut être éolienne (action du vent), glaciaire (action des glaciers), gravitationnelle (glissements, éboulements), anthropique (déforestation, agriculture intensive), hydrique (action de l'eau). L'érosion hydrique, soit l'altération du substrat rocheux par l'eau, est la forme d'érosion la plus répandue et affecte environ 20 % de la surface de l'Europe (Antoni & Darboux, 2009). Elle est le principal type d'érosion affectant les terrains marneux et cet état de l'art ne traitera que de ce type d'érosion.

L'érosion se décrit selon 4 étapes (Demangeot, 1984 ; Valadas, 2005 ; Mathys, 2006) :

- **L'altération/météorisation** : processus par lequel le matériel géologique se désagrège par l'action d'agents atmosphériques sous des processus physiques ou chimiques (Demangeot, 1984 ; Valadas, 2005).
- **Le détachement** : les particules se détachent de leur substratum d'origine.
- **Le transport** : les débris détachés du matériel altéré se déplacent vers l'aval. Le transport est lié à la gravité ou provoqué par d'autres facteurs de l'érosion.
- **Le dépôt** : lorsque qu'il n'y a plus assez d'énergie disponible pour transporter les débris, ceux-ci se déposent.

1.1.1.2. Altération et détachement

Tout d'abord, l'érosion hydrique est soumise à la météorisation des roches. La météorisation désigne un/des processus qui provoquent la fragmentation de la roche sous l'effet des forçages climatiques. La météorisation (ou altération) peut se faire de façon physique ou chimique (Fort, 1999).

Le premier type est l'altération chimique, elle correspond à la rupture des roches par action de composés chimiques. Soit les roches subissent une dissolution par un solvant (eau), car elles sont carbonatées, et les molécules chargées en ions sont dissociées. Cette forme d'altération est ce qui produit par exemple les formations karstiques. Soit les roches subissent une hydrolyse, car elles sont silicatées, et elles deviennent meubles. On retrouve plus cette forme d'altération dans les roches argileuses.

L'altération mécanique correspond à la rupture des roches sans changement chimique. Elle peut se faire par haloclastie, hydroclastie, cryoclastie ou thermoclastie. Les processus de

fragmentation mécanique des roches sont influencés par les saisonnalités du climat environnant. On retient 4 processus principaux (Valadas, 2005) :

- **Hydroclastie** : variation de la teneur en eau dans les roches par des phases d'hydratation/sécheresse. L'eau qui s'infiltré provoque le gonflement de certains minéraux de la roche. Cela donne des fragmentations en petites pellicules comme le schiste ou la formation d'un réseau de fente.
- **Haloclastie** : la présence de sel dans l'eau (milieux littoraux ou désertiques) peut mener à un éclatement de la roche et à sa désagrégation. Il y a une alternance humectation/déshydratation et le cristal croît au fur et à mesure de la déshydratation/réchauffement de la roche qui mène à une expansion thermique des sels.
- **Cryoclastie** : peut créer des pressions suffisantes pour désintégrer la plupart des roches et produire des débris anguleux de taille diverse, que l'on appelle « gélifracsts ». À 0 °C, l'eau pure gèle et ce passage de l'état liquide à l'état solide se traduit par une augmentation de volume de 9 %. Aussi, la formation de lentilles de glace peut fragmenter les roches.
- **Thermoclastie** : variations diurnes de la température sur une roche (on voit beaucoup cela dans les milieux arides comme le désert). La surface de la roche se dilate et se rétracte ce qui crée des petites plaquettes (desquamation) et des désagrégations granulaires.

1.1.1.3. Transport et dépôt

Lors de la phase de transport, les matériaux arrachés sont soit transportés vers le pied des versants soit ils atteignent directement le réseau hydrographique (Mathys, 2006). Le transport se matérialise par diverses formes de ruissellement ainsi que par de petites coulées boueuses centimétriques à décimétriques (Rey et al., 2004). A une échelle très fine, on peut retrouver un effet *splash* sur les versants. Les gouttes de pluies vont faire rejaillir les particules du sol, ce qui va les transporter de quelques millimètres/centimètres.

Ensuite, le ruissellement peut être diffus ou concentré. Pour un ruissellement diffus, les particules détachées par les gouttes de pluie vont être transportées par l'eau qui ruisselle. Cela arrive lorsque que le sol est trop concentré en eau et qu'il n'absorbe plus les précipitations, l'eau se met alors à ruisseler (ruissellement par saturation). Ce ruissellement érode le substratum. D'autre part, lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration des sols (infiltrabilité), le ruissellement est nommé Hortonien.

Mais, dans les marnes, les précipitations provoquent surtout un ruissellement concentré. Les particules préalablement détachées sont remobilisées ou alors sont arrachées directement du substratum par l'écoulement. C'est ce phénomène qui, au long terme, crée des rigoles (*rilling*), puis des ravines (*gullies*) quand leur taille augmente. Cela peut entraîner des évènements tels que des glissements de terrain ou des laves torrentielles. En effet, si, à force de précipitations, la couche altérée est saturée en eau, un phénomène de solifluxion peut être observé. La couche altérée glisse alors par gravité en se comportant comme un fluide. On retrouve ces évènements dans les marnes car les pentes dans les terres noires sont souvent abruptes (30-35°) et alimentent directement les écoulements en sédiments (Descroix et Olivry, 2002 ; Raclot et al., 2005).

Enfin, selon la saison, l'intensité et la fréquence des précipitations les éléments érodés peuvent être emportés vers l'aval du bassin versants ou se déposer sur les berges pour former des alluvions.

1.1.1.4. La morphogenèse des *badlands*

Les *badlands* sont des territoires particuliers que l'on retrouve dans plusieurs pays de l'arc méditerranéen : Alpes du Sud, Pyrénées Espagnoles, Toscane, Grèce, Maroc, Israël (Nadal-Romero et al., 2018). Le terme *badlands* fait référence à un *bedrock* (roche solide non altérée sur laquelle se dépose les sols et alluvions) peu ou pas consolidé en surface et des territoires caractérisés par une forte production de sédiments (Figure 1). Il se caractérise aussi par la faible proportion ou l'absence de végétation et est impropre à l'agriculture (Bryan & Yair, 1982). Morphologiquement, les vallées des paysages de *badlands* sont souvent en forme de V comme celles des Alpes du Sud. Ils présentent une forte densité du réseau de drainage, de nombreuses rigoles et ravines (Gallart, 2002). Cette forme caractéristique est le résultat de l'écoulement des eaux dans le bassin versant.



Figure 1 : Bassin versant du Laval, Alpes-de-Haute-Provence, avril 2024. ©Caroline Le Bouteiller

Le processus de formation des *badlands* dépend fortement du milieu dans lequel ils évoluent (lithologie, conditions tectoniques de la région, climat, ...). La nature et l'état de la roche mère sont les principaux facteurs de contrôle de la formation des *badlands* (Gallart, 2002). Les plus vieux *badlands* se seraient formés lors de périodes tectoniques actives comme ceux de la région d'Almeira, dans le sud-est de l'Espagne, qui se sont formés pendant le Pliocène. Les *badlands* les plus récents seraient le résultat d'activités anthropiques (Nadal-Roméro et al., 2018). Les résultats morphologiques des processus d'érosions seront donc différents selon la nature et l'état de la roche. La morphogenèse d'un *badland* récent peut se résumer en plusieurs étapes (Descroix et al., 2002 ; Mathys, 2006, Nadal-Roméa et al., 2018) :

1. La disparition progressive de la couverture végétale et de la litière laisse à nu des surfaces importantes.
2. Le *bedrock* est altéré par les conditions climatiques : précipitations, alternance phases humide/sèche, gel/dégel. Cela aboutit à la formation d'une couche d'altération appelée régolithe.

3. Les particules se détachent et sont transportées lors de précipitations, l'effet *splash* (rejaillissement lié à l'impact des gouttes d'eau) et la concentration du ruissellement déclenchent l'incision de la matrice du sol.
4. Le sol se creuse en rigoles puis en ravines par action du ruissellement concentré, et lorsque celles-ci deviennent coalescentes, c'est là que se forment les paysages de *badlands*.

Aussi, dans ces *badlands* marneux, la forte altération du sol peut provoquer des profondeurs d'altération allant du millimètre à plusieurs décimètres de profondeur en quelques mois à plusieurs milliers d'années. Mais, il est difficile de donner une estimation précise du fait que cela dépend fortement des caractéristiques de la zone. Le régolithe se constitue d'une couche de surface de matériaux marneux non consolidés. Certains le considèrent comme la première étape de formation d'un sol avec une très faible teneur en matière organique (Gallart, 2002). En 1995, une étude propose 3 classes à ces structures de zones altérées (Antoine et al., 1995) :

- Entre 0 et 10 cm d'épaisseur, la surface est molle et désorganisée. Elle est constituée de plaquettes de marnes qui se désagrègent de quelques millimètres à plusieurs centimètres.
- Entre 10 et 30 cm c'est la zone intermédiaire, elle préserve la structure en lames. Il s'agit d'une zone de transition entre le *bedrock* et la couche de surface très altérée.
- De 30-50 cm à plusieurs mètres de profondeur, on parle de zone intacte ou *bedrock*. C'est la roche originelle solide non altérée.

Les zones de *badlands* sont donc des systèmes complexes dont la quantification de l'érosion est nécessaire pour comprendre leur fonctionnement et peut se faire selon différentes méthodes. Dans les Alpes du Sud, la formation des *badlands* est facilitée par le peu ou l'absence de végétation, soit parce que celle-ci ne s'était pas développée après la dernière glaciation soit à cause d'une surexploitation des terres par les hommes. (Demangeot, 1984 ; Rovéra & Robert, 2005).

1.1.2. Facteurs abiotiques qui influencent la variation des taux d'érosion.

« L'action de la topographie et de l'hydrologie sur la végétation n'est pas dissociable de la rétroaction de la végétation sur la topographie et l'hydrologie » (Carrière, 2019). Ces trois paramètres influent les uns sur les autres, ce qui modèle à long terme la morphologie des *badlands* et leur réaction aux événements climatiques (Figure 2).

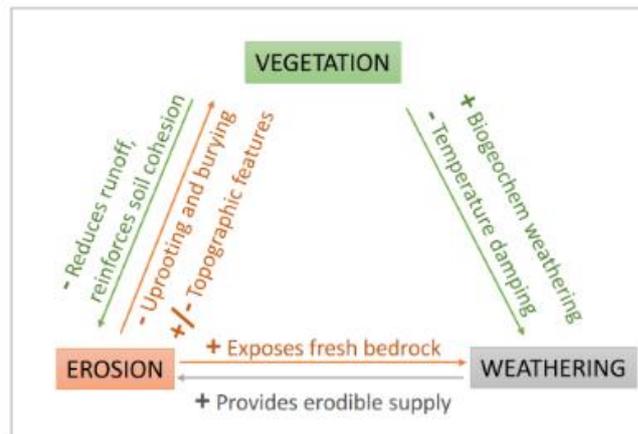


Figure 2 : Interactions végétation-érosion-climat.
Source : Le Bouteiller, 2024

1.1.2.1. Lithologie et sols

Tout d'abord, la lithologie a un fort effet sur son érosivité. Les paramètres de cohésion, de dureté, de perméabilité et de composition minéralogiques sont importants dans la résistance des roches à leur météorisation. La perméabilité peut se définir comme la capacité d'infiltration d'eau dans une roche. Une roche telle que les marnes noires, qui présente une forte porosité en surface (environ 6,8 %), des plans de schistosité, une faible teneur en calcaire et une forte densité en diaclases (ou joints) est largement plus sensible à l'érosion qu'une roche non poreuse et non fissurée (Descroix & Olivry, 2002).

La composition minéralogique et chimique des roches joue aussi. En effet, les minéraux formés à forte pression et/ou haute température lors de mouvements tectoniques s'altèrent plus rapidement que les minéraux qui se sont formés à basse pression et/ou température faibles. Les marnes sont des roches composées en partie de minéraux carbonatés (CaCO_3) et d'argile et font partie des roches qui s'altèrent plus facilement. Mais, en zone montagneuse, les marnes sont surtout altérées par les mécanismes physiques (Ariagno, 2022).

De plus, certains sols sont plus sensibles à l'érosion hydrique. En effet, l'érodibilité d'un sol dépend de sa stabilité structurale. La stabilité structurale est un indice de résistance à la désagrégation d'un sol. Elle dépend de la texture du matériel en présence, de la quantité de matière organique (racines, humus, feuilles au sol) et du type de cation dans le sol (Fox et al., 2008). Les *badlands* sont souvent composés d'une texture d'argiles à grains fins ou de limons et où la quantité de matière organique varie énormément (Antoine et al., 1995). En général, les *badlands* ont une stabilité structurale faible et donc une forte capacité d'érodibilité.

1.1.2.2. La topographie

On sait que certains facteurs topographiques influencent les taux d'érosion. En effet, à partir de l'exposition des versants (adret ou ubac), on peut connaître la durée d'ensoleillement et mieux comprendre les processus de météorisation observés (cycle gel/dégel), notamment en hiver (Descroix & Olivry, 2002 ; Rovéra & Robert, 2005). Mais aussi, dans les terrains marneux, l'angle pente/pendage peut favoriser le détachement de matériaux combiné à une certaine exposition (Descroix & Olivry, 2002). Ces facteurs topographiques peuvent être déterminant combinés à des facteurs climatiques ou écologiques.

Par ailleurs, la présence de reliefs de montagne où le sol est instable, combinée à d'autres facteurs (comme climatiques) peut avoir un effet sur l'érosion (Antoni & Darboux, 2009). En effet, le soulèvement orographique des masses d'airs lorsqu'elles rencontrent des reliefs peut provoquer des précipitations sur un versant et une température accrue sur un autre. De plus, la variation de la température dans un bassin versant de montagne est largement plus importante par rapport à une zone de plaine. Les différences d'altitude accroissent le gradient adiabatique, ce qui combiné avec d'autres facteurs, peut influencer sur l'érosion.

1.1.2.3. Le climat

Le climat étant le facteur déterminant de la formation des badlands et de leur évolution, il existe une classification climatique selon des seuils de précipitations annuels. En effet, les précipitations annuelles et leur intensité conditionnent la dynamique de la couverture végétale (répartition, essence, développement des racines), la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol et le ruissellement, les processus d'érosion (du *rainsplash* au grand mouvement de masse) et donc plus largement sur la résistivité des *badlands* à l'érosion. Gallart et al. (2002) les classe donc en 3 catégories :

- *Badlands* arides (précipitations inférieures à 200 mm),
- *Badlands* semi-arides (précipitations comprises entre 200 mm et 700 mm),
- *Badlands* humides (précipitations supérieures à 700 mm).

Cette disponibilité en eau va influencer la formation du *badland* et son taux de couverture végétale. Dans les *badlands* arides on retrouve surtout une végétation discontinue avec un taux d'érosion peu élevé du fait des faibles précipitations. Les *badlands* semi-arides sont caractérisés par un couvert végétal discontinu et souvent installé en fond de vallée. Les taux d'érosions seront plus élevés pendant la saison humide et les sédiments s'accumuleront durant l'hiver en fond de ravine. Enfin, les *badlands* humides sont des zones de forte érosion avec un couvert végétal plus dense et plus étalé. L'érosion est très forte durant la saison humide et on retrouve des microclimats dans le bassin versant qui mènent à une plus grande variété de processus d'érosion.

1.1.3. Facteurs biotiques qui influencent la variation des taux d'érosion.

La végétation joue un rôle dans la protection des sols face à l'érosion hydrique de plusieurs façons (Rey et al., 2004) :

- Elle réduit l'énergie des précipitations

La végétation joue un rôle dans le cycle de l'eau. La canopée intercepte les précipitations et empêche une partie des gouttes de pluies d'atteindre le sol et réduit donc l'effet *splash*. La puissance de cet effet dépend de l'intensité des précipitations, de la surface du couvert végétal, des surfaces foliaires et terrières. Aussi, les arbres limitent la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol en l'interceptant via les racines qui rendent cette eau à l'atmosphère par évapotranspiration.

- Elle réduit l'énergie du ruissellement et améliore l'infiltration

Si la surface de végétation est importante ainsi que la biomasse végétale au sol, la rugosité de surface est modifiée ce qui limite la vitesse du ruissellement de surface.

La végétation augmente l'infiltration. La forêt est la couverture végétale qui permet une des meilleures infiltrations de l'eau car les sols sont très poreux et le système racinaire développé. Dans les bassins versants marneux, on observe une réelle différence entre les zones végétalisées et non végétalisées. L'étude de Richard et Mathys, présentée lors du colloque sur les bassins expérimentaux de Draix en 1999, a démontré une augmentation du seuil minimal de ruissellement en fonction du taux de végétalisation. Par exemple, pour un bassin versant revégétalisé comme celui du Brusquet qui est semblable au Laval, on observe une diminution de la fréquence des crues (Brochot, 1999).

- Elle maintient les sols et piégeage des sédiments

De plus, de façon générale, le système racinaire consolide le sol et renforce ses propriétés mécaniques.

Dans les zones de pente, les végétaux maintiennent le sol et préviennent les glissements à travers des mécanismes hydrologiques qui diminuent la pression de l'eau interstitielle et le renforcement du sol par le système racinaire. Le niveau de maintien des sols dépend de plusieurs variables : la morphologie des racines, le pourcentage de racines fines, leur biomasse, leur diamètre et leur profondeur et leur résistance à la traction (Burylo et al., 2010). De plus, les parties aériennes de la plante (racines qui ressortent, tronc) peuvent piéger les sédiments et faire office de protection passive en les empêchant d'aller vers le bas du versant par gravité.

- Elle résiste au déracinement et à l'ensevelissement

La végétation, du fait du stade de développement de son système racinaire, peut résister à l'érosion et au déracinement. Elle agit alors comme une protection active. Elle peut aussi agir comme une protection passive en résistant à l'ensevelissement grâce à sa vitesse de croissance.

- Elle régule la température et joue un rôle de protection thermique

Un couvert végétal étendu limite les variations importantes de la température du sol et peut limiter les cycles gel/dégel en hiver et ainsi réduire le phénomène de gélifraction.

Il est néanmoins important de préciser que la végétation peut aussi avoir un impact négatif sur l'érosion des sols. Par exemple, les racines peuvent élargir les voies d'écoulement de l'eau, modifier la pression et favoriser les glissements de terrain et l'érosion, c'est ce qui est appelé la bioturbation. (Brantley et al., 2017).

1.1.4. L'avenir des *badlands* face au changement climatique

Un des objectifs principaux de la mise en place de l'Observatoire est d'améliorer la prédiction de la réponse des bassins versants de montagne aux aléas climatiques (intensité des précipitations, modifications des températures...). Les scénarios climatiques montrent globalement une réduction des précipitations annuelles, une réduction du nombre de jours de précipitations et de gel par an, une modification de l'humidité et un accroissement de l'intensité des précipitations. Plus précisément, la modélisation des précipitations entre 2071 et 2100 (avec une période de référence entre 1961 et 1990) pour le scénario A2 du GIEC, prédit un abaissement annuel des précipitations toutes saisons confondues là où sont situés les *badlands* dans certains pays comme le centre et la partie sud de l'Espagne, le centre et le sud de l'Italie et la Grèce (Clarke et al., 2010). De plus, la fréquence des précipitations pourrait décroître mais

les cyclones observés à l'intérieur du territoire méditerranéen seront plus intenses (Anagnostopoulou et al., 2006).

De fait, la réduction des précipitations annuelles va avoir un impact sur le couvert végétal, déjà peu développé dans les zones de badlands semi-arides et arides. Cette aridité croissante va mener à un stress hydrique des végétaux et donc une mutation progressive des essences présentes. Potentiellement, certains *badlands* pourraient tendre à une évolution inverse à la dynamique de revégétalisation que l'on observe aujourd'hui et perdre en taux de couvert végétal. Ces zones seraient alors d'avantages exposées au ruissellement. Une modification des intensités et fréquences des pluies pourrait être observée ce qui va agir directement sur les dynamiques d'érosion. Dans les *badlands* arides et semi-arides, le ruissellement annuel diminuera mais des événements pluvieux plus rares et d'une intensité plus forte pourraient accroître les taux d'érosions. En revanche, dans les *badlands* humides, il pourrait y avoir une possible continuité de la croissance de la végétation et donc une diminution de l'érosion en rigole (Nadal-Romero et al., 2018). Enfin, pour ces *badlands* humides, l'augmentation de la température à l'année pourrait mener à une réduction du phénomène de gélifraction observé et réduire les taux d'érosions (Nadal-Romero et al., 2021).

1.1.5. La quantification de l'érosion par LiDAR

Aujourd'hui, une des techniques d'étude en cours de développement pour étudier des terrains difficilement accessibles est le LiDAR (*Laser imaging Detection And Ranging*). C'est une méthode de télédétection dite « active » qui utilise sa propre source lumineuse afin de collecter des données. La technologie LiDAR associe un instrument équipé d'un ou plusieurs lasers avec des interactions entre la lumière émise et des objets (microscopiques ou macroscopiques), un aller-retour du rayonnement laser et un récepteur (Bonod, 2019). L'instrument à technologie LiDAR émet un faisceau laser qui est réfléchi lorsque celui-ci atteint la surface visée et décrit un nuage de points (Levy, 2011). L'instrument de mesure peut être de type terrestre (mobile ou stationnaire) ou aéroporté (drone/avion/hélicoptère).

Plusieurs études sur l'hydrologie en montagne utilisant des données LiDAR ont déjà été réalisées. A une échelle très fine, une étude a cherché à déterminer par LiDAR terrestre dans le plus petit bassin versant de l'ORE Draix, la dynamique d'apparition des formes d'érosion de petite taille telles que les rigoles élémentaires, griffures, pendant le cycle hydrologique annuel (Puech et al., 2009).

Entre début 2008 et avril 2010, des chercheurs ont réalisé des levés LiDAR sur le Bès, un affluent de la Bléone (Alpes-de-Haute-Provence), pour étudier l'évolution morpho dynamique du lit fluvial. Ces nuages de points ont été triés et maillés afin d'obtenir des MNT puis soustraits l'un à l'autre pour obtenir une carte d'érosion (différence d'altitude). Il a été mis en évidence qu'une crue avait provoqué des changements en 2009 (Tacon et al., 2012).

Aussi, un rapport technique en 2017 établit une méthodologie de comparaison topographique 3D à haute résolution pour les données LiDAR aéroportées en prenant comme un exemple un torrent de montagne (Saint-Antoine à Bourg-d'Oisans). Deux techniques ont été utilisées. La première est la différence entre MNT comme expliquée au paragraphe précédent. La seconde consiste en l'utilisation de l'algorithme M3C2 (*Multiscale Model to Model Cloud Comparison*) qui garde une représentation 3D de l'objet à comparer (Kuss et al., 2017).

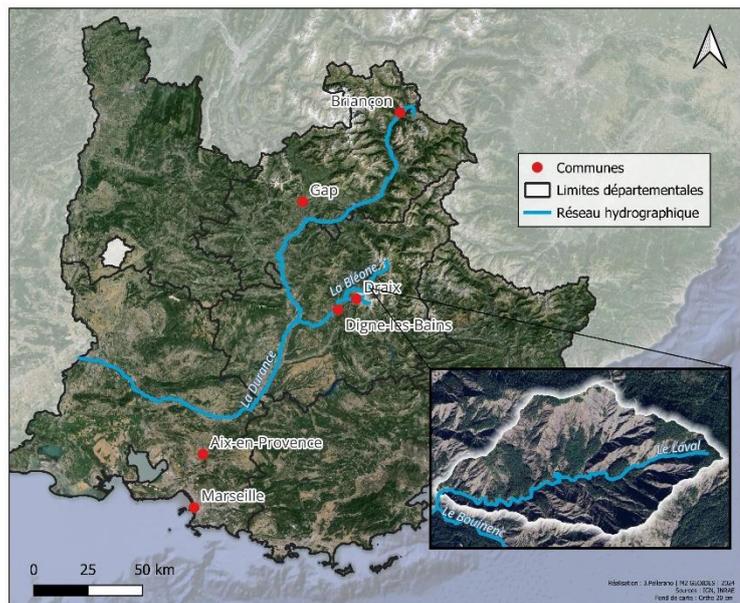
Avant de quantifier l'érosion du bassin versant du Laval par méthode LiDAR, connaître les caractéristiques du terrain s'avère nécessaire.

1.2. Présentation du site d'étude : le bassin versant du Laval

1.2.1. Présentation globale

Le bassin versant du Laval est situé à 10 km à l'est de Digne-les-Bains dans le département des Alpes-de-Haute-Provence (04) (Figure 3). Il fait partie de l'observatoire Draix-Bléone mis en place en 1983 pour étudier le ruissellement, l'érosion et le processus de transport des sédiments dans des petits bassins versants de montagne (Klotz et al., 2023 ; Mathys, 2006).

De plus, il appartient depuis 2015 à l'Observatoire français sur l'étude des Zones Critiques (OZCAR). Cet observatoire a pour objectif de faire interagir des chercheurs aux spécialités différentes pour mieux faire face aux effets des changements climatiques sur la zone critique. La zone critique est le milieu où interagissent tous les systèmes. Elle est appelée comme telle car elle est le siège de la vie et l'habitat de l'espèce humaine (Gaillardet et al., 2018). Les terres noires de l'Observatoire Draix-Bléone sont donc étudiées et instrumentées car la réponse hydrologique et sédimentaire très rapide en fait un laboratoire d'étude à ciel ouvert.



Les bassins versants de l'observatoire Draix-Bléone fournissent notamment 40 % des sédiments fins du bassin de la Durance. Dès 1996, certains chercheurs affirment que l'érosion fluviale atteint sa plus grande efficacité dans les petits bassins versants torrentiels (Delannoy & Rovéra, 1996). C'est en effet le cas pour le bassin versant du Laval qui a le taux d'érosion le plus élevé de l'observatoire Draix-Bléone (parfois deux fois plus importants que d'autres bassins). Le transport des sédiments de cet observatoire peut atteindre des concentrations de matière en suspension (MES) entre 800 et 900 g/L avec un rendement annuel moyen de 16 000 t/km²/an pour le Laval (Le Bouteiller et al., 2021).

1.2.2. Topographie et géologie

Ce petit bassin versant de 0,86 km² situé entre 850 et 1250 mètres d'altitude appartient au bassin versant de la Bléone. Le Laval est un affluent de la rivière Bouinec qui se jette plus bas dans la Bléone (Mathys, 2006). A une échelle régionale, la Bléone appartient au bassin versant de la Durance qui est un affluent du Rhône.

La lithologie de la région est composée de roches sédimentaires, terres noires (ou *badlands*), qui se sont formées durant l'ère Mésozoïque et plus précisément le Jurassique (201 à 145 Ma). Elles sont le fruit des dépôts de sédiments argilo-calcaires pendant la mer du Jurassique, la Téthys. Cette couleur très sombre des roches est due à la présence de la pyrite, qui se forme dans les milieux pauvres en oxygène, par action de bactéries sur la matière organique qui s'est accumulée (Géoparc Haute-Provence¹).

Pour le bassin versant du Laval, on observe surtout des terres noires datant du Bathonien supérieur à l'Oxfordien inférieur (il y a 166 à 163 Ma environ). Une faille est aussi présente et traverse du Nord au Sud le bassin. Elle est constituée de marno-calcaires à *Cancellophycus* (fossile d'organisme vivant provenant de la Téthys) datant du Bajocien (entre 170 et 168 Ma). Enfin, il y a aussi quelques zones de colluvions qui se sont formées durant le Quaternaire (2,5 Ma à aujourd'hui). Ces formations meubles sont des limons ou des cailloutis qui ont subi un faible transport et qui ont été déposés ici depuis les hauts versants (Figure 4). Ainsi sur le bassin du Laval, le manteau d'altérites ou régolithe moyen est de 60 cm de profondeur (Maquaire et al., 2002).

C'est notamment du fait des facteurs topographiques et de la lithologie que le réseau hydrographique est aussi dense. Le chenal principal du Laval fait environ 1 km de longueur, mais ce bassin versant se subdivise en plusieurs sous bassins. Le fort ravinement de ce terrain met en avant des formes telles que les rigoles, les ravines, les chenaux secondaires et le chenal principal.

¹ Géoparc de Haute Provence. « Les marnes noires ». Consulté le 03/05/24.
https://www.geoparchauteprovence.com/point_interet_carte/les-marnes-noires/

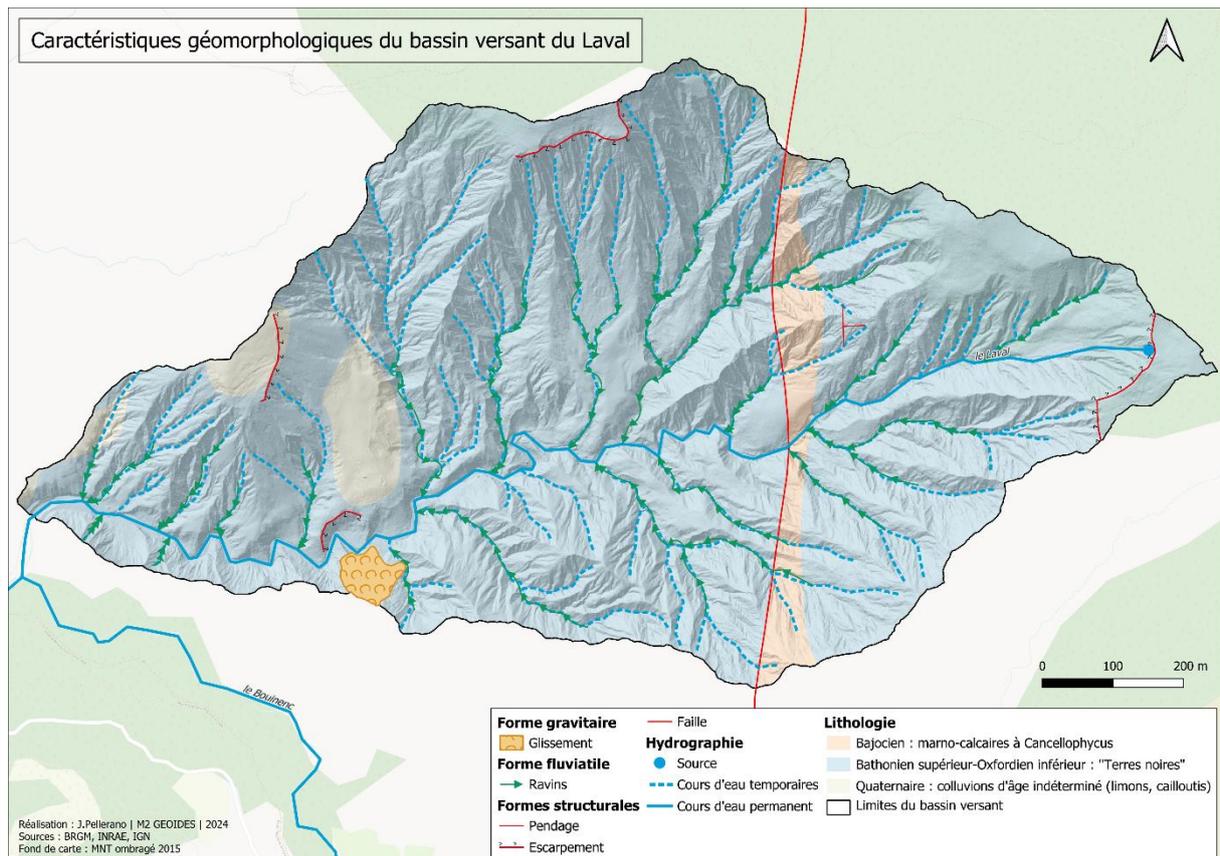


Figure 4 : Carte géomorphologique du bassin versant du Laval, Alpes-de-Haute-Provence

1.2.3. Conditions climatiques

Le climat de cette zone est caractérisé comme à la fois méditerranéen et à la fois montagnard. Neuf pluviomètres sont répartis sur l'ORE Draix (Observatoire de Recherche en Environnement), dont deux dans le bassin du Laval (Klotz et al., 2023). On observe une moyenne de 200 jours de soleil par an et seulement 5 jours avec des pluies intenses dépassant les 30 mm (Mathys et al., 2003). Aussi, la zone est marquée par des alternances du gel/dégel en hiver et des phases d'hydratation/sécheresse en été (Antoine et al., 1995). Plus précisément le climat est scindé en deux périodes de pluies en automne et au printemps. On retrouve des hivers avec des périodes froides et de nombreux cycles de gel/dégel et des étés avec des températures très chaudes et des averses orageuses qui peuvent être à l'origine de crues intenses (Raclot et al., 2005 ; Rovéra & Robert, 2005, Klotz et al., 2023).

Par ailleurs, une station climatique a été installée en 2000 sur la crête entre les bassins versants du Laval et du Moulin. Elle mesure la température, l'humidité de l'air, le rayonnement, la vitesse et la direction du vent. La température moyenne est estimée à 9,9°C (2001-2022) en 2023 et la moyenne des précipitations annuelles à 919 mm entre 1985 et 2022 (Klotz et al., 2023). Les *badlands* de cet observatoire sont donc des *badlands* humides du fait que les précipitations sont supérieures à 700 mm/an (Gallart et al., 2002).

1.2.4. Couverture végétale

Le déboisement intensif des montagnes a provoqué de nombreuses catastrophes comme des crues, inondations de villages, laves torrentielles et envasement en fond de vallées (Rey et al., 2002). Pour pallier ce problème, au 19^{ème} siècle est créé le service des Restauration de Terrain

de Montagne (RTM), service spécialisé de l'administration des Eaux et Forêts (ONF aujourd'hui). Les territoires autour de notre zone d'étude sont principalement reboisés avec du pin noir d'Autriche (*pinus nigra*). Le pin noir était l'espèce la plus adaptée pour reconstituer les terres noires et a été utilisé comme essence relais pour permettre la recolonisation naturelle des feuillus plus tard (Office National des Forêts ²; Vallauri, 1997).

En 2003, Mathys et al. notent que les taux d'érosion entre un bassin versant marneux dépourvu de végétation (le Laval) et un bassin versant reboiser fin 19^{ème} siècle (le Brusquet) sont considérablement différents. La comparaison entre le Laval et le Brusquet suggère que l'érosion et le rendement sédimentaire sont très influencés par la présence de végétation (Carrière, 2019). Dès 2004 Rey et al., suggèrent que la végétation « *peut empêcher l'ablation du substrat, favoriser la sédimentation, en retenant les sédiments érodés plus à l'amont* ». L'étude de l'évolution du couvert végétal par analyse d'images satellites réalisée en 2023 démontre qu'il y a 3 types de couvert végétal que l'on retrouve dans le bassin versant du Laval : les résineux, les feuillus et les pelouses (Annexe 1) (De Almeida, 2023). Aujourd'hui, le bassin versant du Laval est doté de plusieurs espèces d'herbacées, de pelouse, de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), de hêtre et surtout de pin noir d'Autriche (*Pinus nigra*). Cette dernière espèce a été utilisée pour reboiser d'autres bassins voisins et au fil des années, elle a recolonisé naturellement le bassin versant du Laval (Vallauri, 1997).

Effectivement, contrairement à d'autres bassins versants de l'Observatoire, le Laval n'a pas été reboisé volontairement mais s'est revégétalisé naturellement. Entre 1982 et 2021, la surface végétalisée dans le bassin a évolué de 37 % à 46 % (De Almeida, 2023). Ce sont les résineux qui se sont le plus développés passant de 17 % à 34 % du total du couvert végétal (Figure 5). Cette hausse est liée à la végétalisation des sols nu qui s'est fait par la colonisation et l'extension depuis des zones déjà végétalisées en 1982. Quant aux feuillus, leur taux de couvert végétal est plutôt stable (4 à 5 %). A l'inverse, les pelouses ont connu une forte diminution et ont surtout été remplacées par des résineux (De Almeida, 2023).

² Office National des Forêts. « La grande Histoire des forêts (#Episode 1) : le reboisement des massifs montagneux, salvateur et protecteur ». Consulté le 14/05/24. <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/+fb4::la-grande-histoire-des-forets-episode-le-reboisement-des-massifs-montagneux-salvateur-et-protecteur.html>

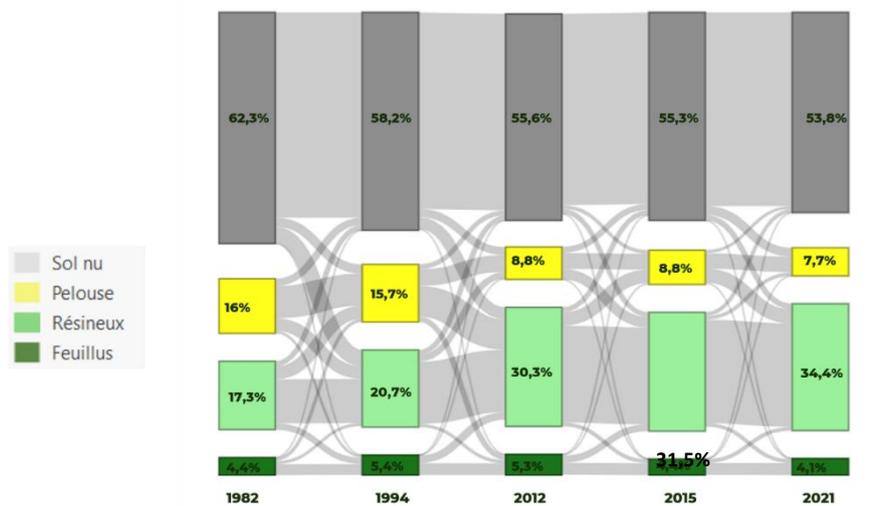


Figure 5 : Transition du couvert végétal entre 1982 et 2021 dans le bassin versant du Laval (source : De Almeida, 2023)

1.2.5. Quantification de l'érosion dans l'observatoire de Draix-Bléone

Dans la partie sud des Alpes Françaises, les taux d'érosions dans les marnes jurassiques sont de l'ordre du centimètre par an (Delannoy & Rovéra, 1996). L'estimation et la quantification de l'érosion peut se faire de diverses manières. Dans tous les cas, elle implique la manipulation et la connaissance de nombreuses informations sur l'environnement du bassin versant. Depuis 1983, l'érosion dans l'observatoire de Draix-Bléone a été étudiée de plusieurs façons. Différentes données sont collectées de manière régulière dans l'observatoire grâce à la présence d'une station hydro-sédimentaire à l'aval de chaque bassin versant (Klotz et al., 2023).

Pour la mesure de l'érosion, ce sont les stations hydrosédimentaires, installées dans le début des années 80, qui permettent de récolter des données sur les matières en suspension (turbidimètre et prélèvement d'échantillons), la hauteur d'eau et les matériaux grossiers (Figure 6). Dans le cas du bassin versant du Laval, la station hydro sédimentaire a été mise en place en 1984 (Mathys, 2006 ; Klotz et al., 2023).

Les hauteurs d'eau sont mesurées par le limnigraphe. La capture d'information varie selon le niveau de l'eau. En hiver, une mesure est réalisée toutes les 10 secondes contre 1 minute en été. Lors d'inondations et notamment les orages d'été, le pas de temps de mesure est modifié à 10 secondes dans le but d'enregistrer au mieux les dynamiques d'inondation. Les informations ne sont gardées que lorsque le niveau varie de plus de 5 mm entre deux mesures.

Pour étudier les MES, la récolte d'informations sur la turbidité et les prélèvements des échantillons se font quand la hauteur d'eau dépasse un certain seuil (20 cm au Laval). Le préleveur peut récolter jusqu'à 24 échantillons d'1 litre avec une fréquence maximale d'un par minute et le turbidimètre peut enregistrer des données jusqu'à une fréquence de 10 secondes. Pour la mesure du charriage, l'évolution topographique de la plage de dépôt (en m³) est mesurée après chaque crue et comparée à la topographie précédente. La mesure du transport solide est donc estimée par les valeurs à l'exutoire des matières en suspension (MES) et la charge du fond du lit (plage de dépôt). La somme des matériaux grossiers qui s'accumulent dans la plage de dépôt et les mesures des matières en suspension permettent d'estimer le volume exporté à l'exutoire des bassins (Annexe 2). Les taux de fourniture sédimentaire dans les bassins versants

de l'observatoire ont été évalués à plus de 16 000 t/km²/an dans le bassin versant le plus actif (Klotz et al., 2023).

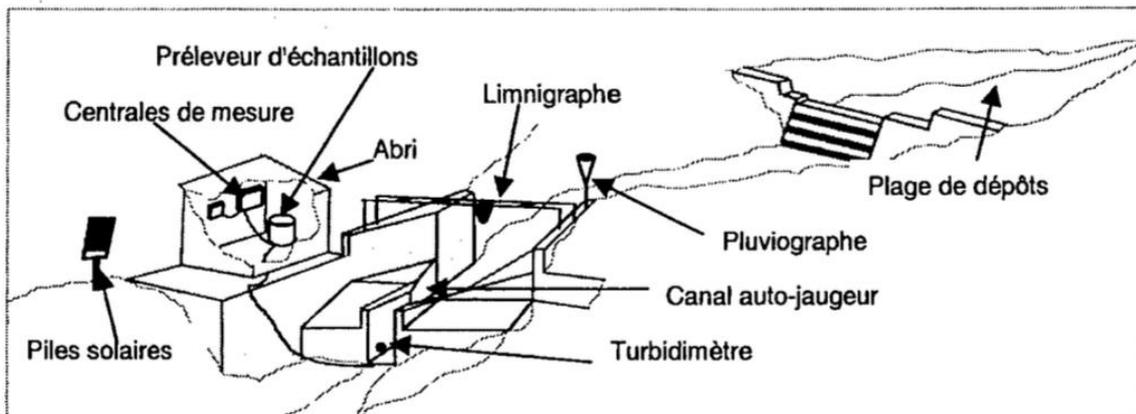


Figure 6 : Instrumentation des sites de mesures. Source : Mathys, 1999

De nombreuses études ont été réalisées pour calculer l'érosion dans les bassins versants de l'observatoire :

AUTEURS	METHODE	RESULTATS
EGELS ET AL., 1989	Premiers levés topographiques et photogrammétriques (la Roubine)	Calcul volume total des matériaux disparus entre 1985 et 1986 : 41 mm d'ablation
MATHYS ET AL., 2003	Depuis 1988, un modèle pluie-débit-érosion (ETC model) a été développé par le CEMAGREF (INRAE aujourd'hui).	Ce modèle simule les dynamiques hydrologiques et sédimentaires à l'échelle de la crue
MATHYS ET AL., 2003	Mesures micrométriques sur le bassin versant du Laval	Ablation moyenne de 9 mm/an, fortes variations selon la pente, le faciès de la marne et l'épaisseur du régolithe
CORONA ET AL., 2011	Approche dendrochronologique au bassin versant du Moulin (8 ha) pour estimer l'épaisseur des sols érodés. 123 coupes transversales ont été relevées dans des racines de Pins Sylvestres	Les résultats démontrent une ablation du terrain entre 6 et 7 mm/an
BECHET ET AL., 2016	Dans le bassin versant de la Roubine, une étude sur les	Hiver : régolithe meuble s'accumule dans les ravines.

	cycles d'érosion a été réalisée sur une période de 2 ans.	Printemps : matériaux déplacés dans les ravines principales. Fin printemps-été : matériaux sont transportés dans les cours d'eaux principaux
--	---	---

Tableau 1 : Différentes études réalisées dans les bassins versants de l'ORE Draix-Bléone pour la quantification de l'érosion

Enfin, aucune étude de taux d'érosion spatialisée n'a été réalisée avec le LiDAR à l'échelle du bassin versant dans l'observatoire Draix-Bléone avant aujourd'hui (Bechet et al., 2016). En outre, sur d'autres cours d'eau, cela a déjà été tenté pour étudier leur évolution morphologique et une méthodologie pour quantifier l'érosion a été produite par le RTM (Tacon et al., 2012 ; Kuss et al., 2017). Les différents suivis ont permis d'obtenir des chroniques sur le long terme des exports sédimentaires dans les bassins versants de l'observatoire Draix-Bléone et notamment au Laval. Mais on ne sait pas encore précisément de quelles zones sources proviennent les sédiments de ce bassin, ni quels facteurs contrôlent ces exports. La méthodologie ci-dessous tente de répondre à ces questions.

2. Méthodologie

2.1. Production de la carte de comparaison des nuages

La réalisation d'une cartographie d'évolution de la topographie entre 2015 et 2021 sur le bassin versant du Laval par une analyse diachronique entre deux nuages de points LiDAR comporte plusieurs étapes (Figure 7). Les levés LiDAR ont été acquis par la méthode ALS (Airborne lasers scanning). La méthodologie se divise en trois phases. Les nuages doivent être nécessairement prétraités et réalignés, puis la différence entre les deux nuages est réalisée. Pour valider les résultats obtenus, des zones stables autour du bassin sont comparées selon la même méthode.

Cette méthode a été choisie après plusieurs essais. En effet, lorsque l'on veut comparer deux nuages de points, 2 méthodes sont possibles. La première consiste à créer deux MNT et à faire une différence. Dans notre cas, cela n'est pas possible car les deux nuages de points nous souhaitons obtenir une carte d'une précision millimétrique. La seconde possibilité est de calculer les distances à partir des nuages eux-mêmes. Ces distances peuvent être calculées de points à points ou de points à maillage. Cette technique a été testée mais la densité des nuages étant différente cela ne fonctionnait pas. Dans cette étude, il a été décidé qu'un des deux nuages serait maillé et comparé à l'autre nuage brut.

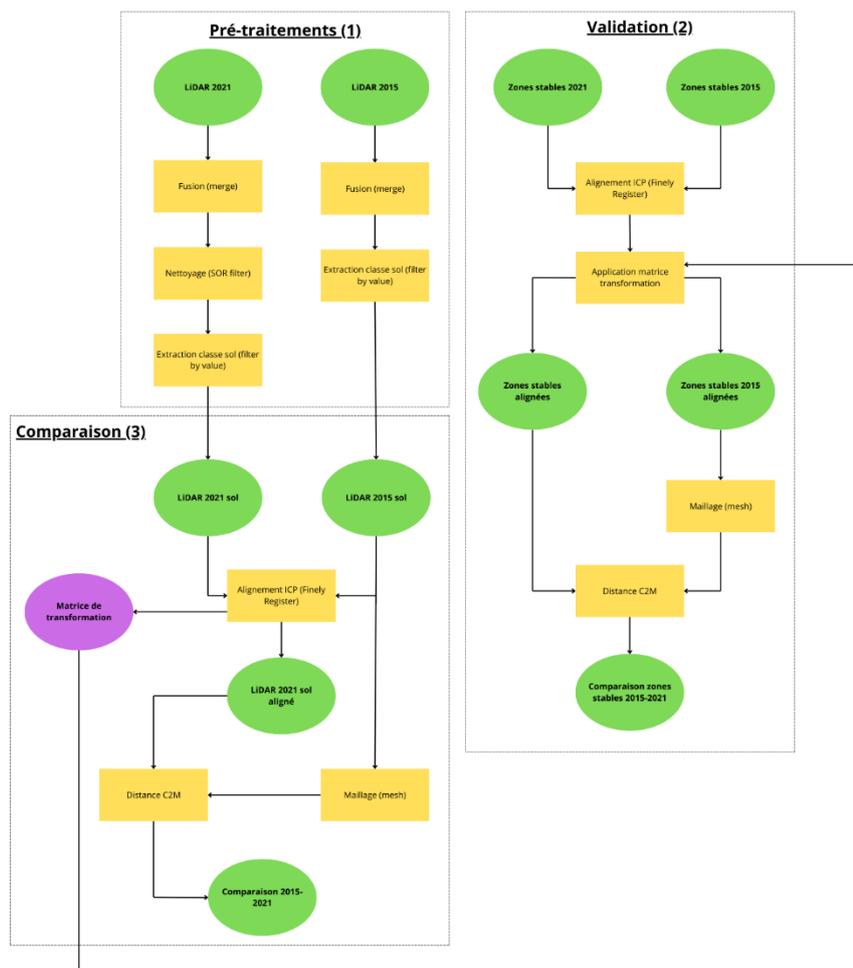


Figure 7 : Méthodologie de comparaison de nuage LiDAR pour la production d'une carte d'érosion spatialisée dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

2.1.1. Pré-traitements

Nuage de 2015

Le levé a été réalisé le 7 avril 2015 par le bureau d'étude Sintégra pour INRAE. Il s'inscrit dans le cadre d'une campagne de terrain par vol hélicoptère à 550 mètres au dessus du sol couvrant 3 bassins versants de l'Observation Draix-Bléone (Laval, Moulins et Brusquet). La densité moyenne des points après classification est d'environ 40 points/m² (IRSTEA & Sintégra, 2015).

Avant de pouvoir réaliser la comparaison, une série de pré-traitements est appliquée sous Cloud Compare. D'abord, les 37 tuiles correspondantes au bassin versant du Laval sont fusionnées (156 millions de points). Le nuage n'est pas directement redécoupé selon les limites exactes du bassin afin de pouvoir réaliser une validation plus tard sur des zones stables (toits par exemple). Pour ce nuage, il n'y a pas besoin d'appliquer de filtre pour supprimer les bruits (valeurs aberrantes) car ceci a déjà été réalisé par Sintégra. Le nuage de point est originellement classé en 2 classes : sol et sursol. La classe « sol » est extraite car elle comprend tous les points ayant été détectés sous la végétation et les points classés comme sol nu (59 millions de points) (Figure 8).

Nuage de 2021

Le nuage de point de l'année 2021 provient de l'Institut Géographique National (IGN) et est issu d'une acquisition aérienne dans le cadre du programme national LiDAR HD. Cette campagne diffuse une cartographie 3D de l'intégralité du sol et du sursol de la France en données classées ou optimisées. Les données sont en accès libre sur le site de l'IGN. Chaque point issu des données LiDAR IGN contiennent des informations sur sa géométrie (x, y, z), l'intensité du signal de retour, la classe à laquelle il appartient, l'angle de scan, etc... (IGN, 2023). Ce sont 12 tuiles optimisées qui sont récupérées. Les nuages de points optimisés sont des nuages classés qui ont été corrigés interactivement en y rajoutant des points virtuels sous certains objets tels que des ponts pour pouvoir modéliser le sol sous ces objets (IGN, 2023). Ces tuiles ont été acquises entre mi-juin et fin juillet 2021. Comme pour le nuage de 2015, des pré-traitements sont appliqués. Les tuiles sont fusionnées sous le logiciel Cloud Compare (400 millions points) puis le nuage est découpé selon l'emprise du nuage de 2015 (41 millions points). Ensuite, les valeurs aberrantes sont supprimées. Enfin, la classe sol, soit les points sans présence de végétation, de bâtiments ou de sursol pérenne, est isolée des autres classes. Le nuage contient alors 21,7 millions de points et pour la classe sol, la densité moyenne des points est de minimum 10/m² (IGN, 2023) (Figure 8).

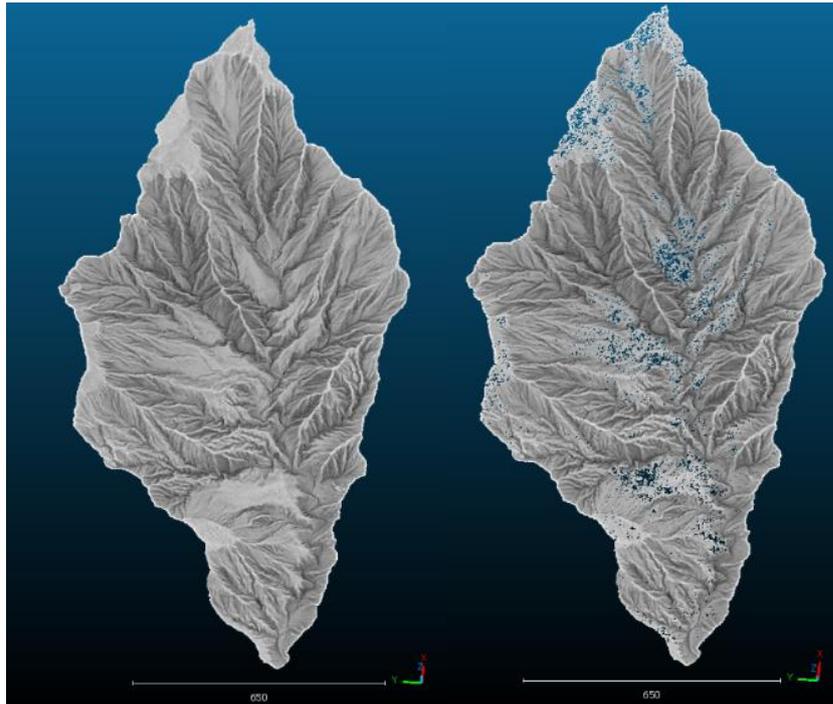


Figure 8 : Représentation des nuages de points de 2015 (gauche) et 2021 (droite) sous Cloud Compare ©J.Pellerano

2.1.2. Alignement des nuages

Pour aligner les deux nuages de points, la fonction *Finely register* est utilisée. Cette fonction se base sur l’algorithme ICP. Cet algorithme introduit par Besl et McKay (1992) est basé sur une méthode de calcul du point le plus proche d’un point donné sous une transformation euclidienne (Yang et al., 2016). Il cherche donc à aligner au mieux les deux nuages par une méthode itérative de transformation qui permet de minimiser la distance entre le nuage de point qui va être transformé et le nuage de référence (Figure 9).

L’algorithme est basé sur 4 étapes (Kuss et al., 2017 ; Douadi et al., 2005) :

- 1- Pour chaque point du nuage à aligner est trouvé le point correspondant le plus proche du nuage de référence ;
- 2- Une transformation (rotation + translation) permet d’aligner au mieux les deux nuages de points ;
- 3- Le nuage à aligner est transformé ;
- 4- Les étapes 1 à 3 sont répétées jusqu’à atteindre une différence d’erreur minimale.

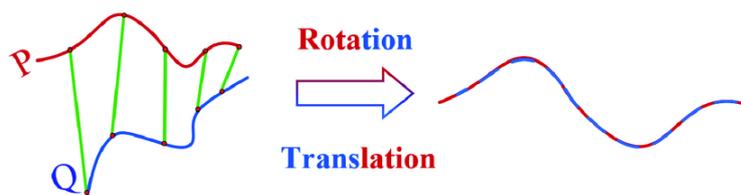


Figure 9 : Principe de l’algorithme ICP (Si et al., 2022).

Le nuage de 2015 est désigné comme le nuage de référence car plus dense et le nuage de 2021 comme celui à réaligner. La différence d'erreur (RMS) est fixée à $1,0E-05$ pour stopper l'itération. Il est compliqué de diminuer d'avantage ce seuil car cela demande énormément de puissance à l'ordinateur. On obtient alors la matrice de transformation, qui met en évidence le recalage du nuage le moins dense par rapport au nuage le plus dense.

2.1.3. Validation du bon alignement des nuages

Afin de valider le bon alignement et les résultats de la comparaison, des zones stables sont découpées manuellement sur les deux nuages d'origine. Ces zones correspondent à des toits de bâtiments qui n'ont donc pas évolué entre 2015 et 2021 (Figure 10). La matrice de transformation obtenue lors de l'étape d'alignement des nuages est appliquée aux zones stables. Une fois le réalignement effectué, la méthodologie est la même que pour les deux nuages de points principaux. Les trois zones stables de 2015 sont maillées puis la différence est faite entre les zones stables de 2015 maillées et le nuage de 2021.

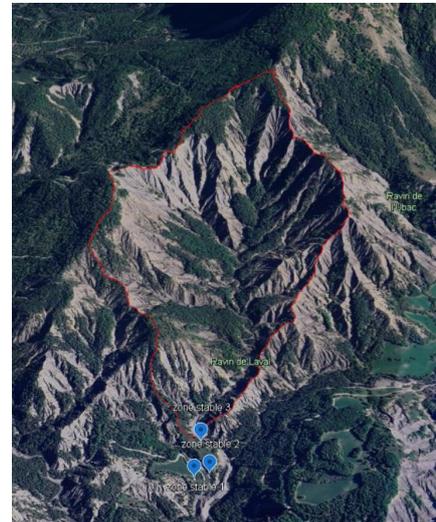


Figure 10 : Localisation des zones stables

2.1.4. Maillage et comparaison

Afin de réaliser une comparaison la plus juste possible, il a été décidé que le nuage le plus dense serait maillé pour être comparé avec le nuage le moins dense. En effet, il n'aurait pas été possible de mailler le nuage moins dense (2021) car le fait qu'il y ait beaucoup de zones sans données aurait pu fausser les valeurs d'altitude du maillage.

Comme précisé précédemment, le nuage de point de 2015 est plus dense que celui de 2021. Le maillage 2,5 D se fait selon la méthode de la triangulation de Delaunay. Les points les plus proches sont associés par des polygones pour former un triangle. La variation en z de la surface entre les deux années est calculée selon la distance entre le nuage de points 2021 et le maillage de 2015.

Une fois la comparaison réalisée, un nuage de point des distances signées est obtenu. La valeur moyenne correspond à une variation d'altitude de $-0,06$ mètre. La variation oscille entre $-2,89$ mètres + $2,71$ mètres (Figure 11).

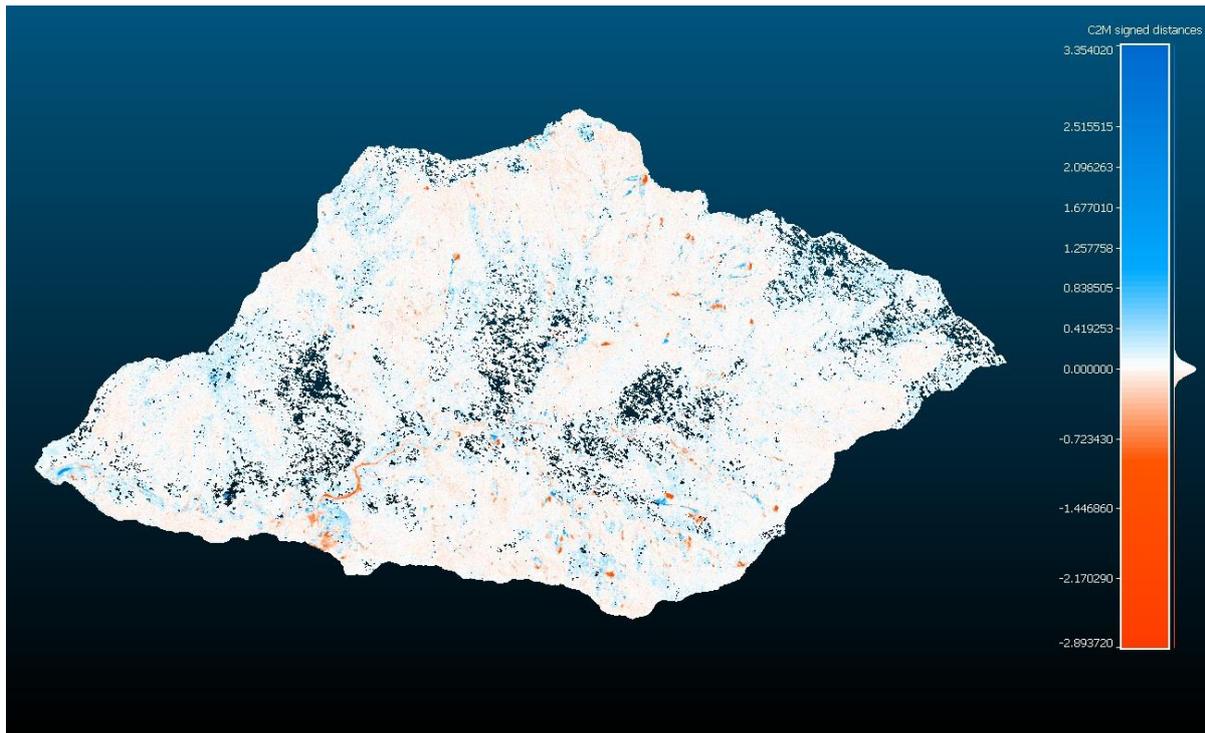


Figure 11 : Nuage résultat des distances entre 2015 et 2021 à partir des données LiDAR dans le bassin versant du Laval.

2.1.5. Rastérisation et découpage selon l'emprise du Laval

La comparaison est rastérisée sous Cloud Compare puis découpée selon l'emprise du Laval afin de pouvoir être analysée statistiquement plus tard sous R. En effet, le nuage de point seul est trop dense et il est impossible de l'analyser de façon brute sous R.

Lors de la rastérisation, une résolution à 50 cm est décidée. Ce choix est basé sur un compromis. En effet, si l'on prend une résolution trop grossière, on perd de l'information. Et d'autre part, les essais de rastérisation à des échelles trop fines présentaient énormément de zones en *no data* et mettaient en évidence des pixels pour lesquels il n'aurait pas été possible de définir des valeurs d'érosion. Enfin, les données utilisées à l'étape suivante ont une résolution de 50 cm et choisir la même résolution pour la carte de comparaison évite une étape supplémentaire de rééchantillonnage de tous les autres rasters.

De plus, la comparaison réalisée sous Cloud Compare pouvant ne pas être rigoureusement exacte, les données sont recalées selon les exports sédimentaires mesurés à l'exutoire (charriage + matériaux en suspension) entre 2015 et 2021, de sorte que la différence d'altitude moyenne corresponde à la quantité de matière totale exportée à l'exutoire du bassin sur la même période. On calcule la différence entre la moyenne des distances du nuage résultat et le taux de fourniture sédimentaire à l'exutoire, puis on recalcule les données selon la différence obtenue. Enfin, la plage de dépôt située à l'aval du bassin est retirée du raster afin de ne pas fausser les statistiques réalisées plus tard (Annexe 3).

2.2. Recherche des facteurs de contrôle de l'érosion

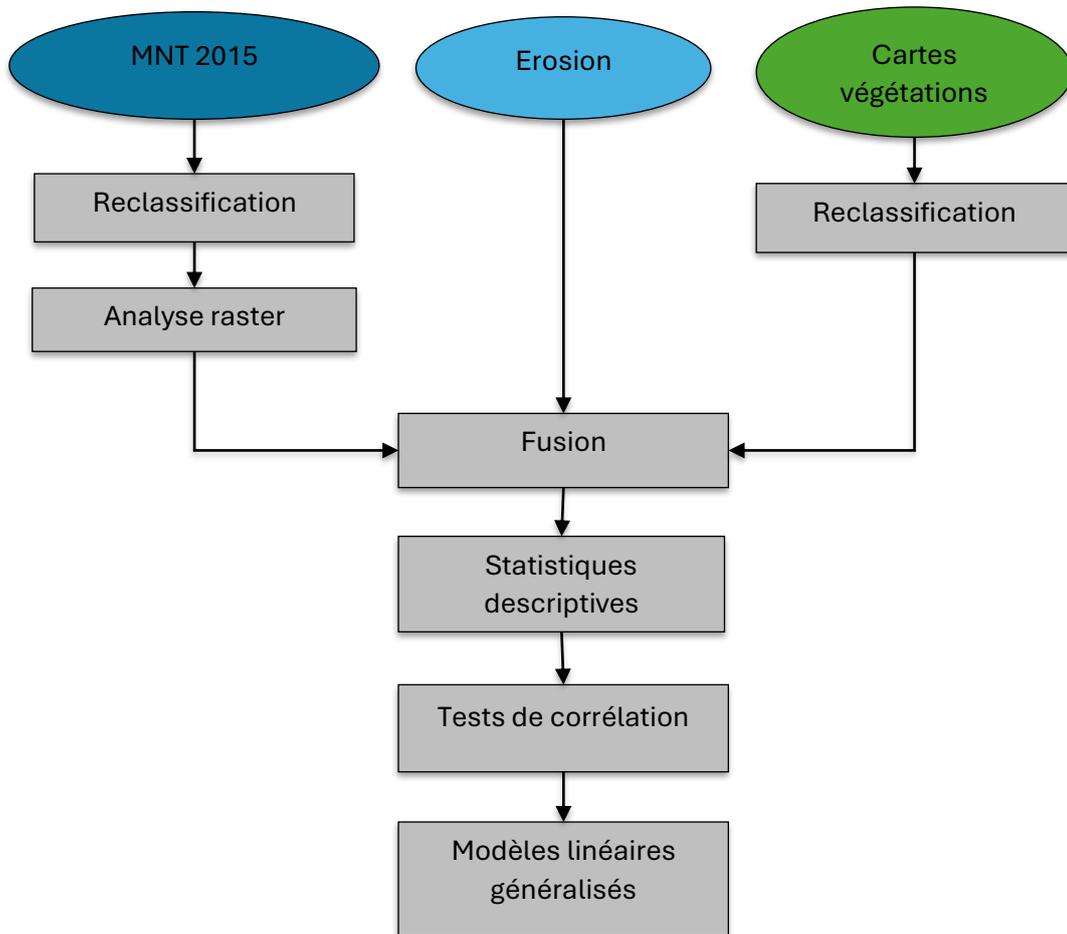


Figure 12 : Méthodologie pour la recherche des facteurs de contrôle qui peuvent influencer les valeurs d'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

2.2.1. Sélection, calcul et classement des facteurs

Au total, 8 facteurs ont été choisis. Ils sont répartis en deux catégories : les facteurs topographiques et les caractéristiques écologiques (Tableau 2).

<i>Facteurs</i>	<i>Modalités</i>
Pente	18 classes. 0 à 90° avec une alternance 5 par 5
Exposition	Nord / NE / Est / Sud est / Sud / Sud ouest / Ouest / Nord ouest
Altitude	800-900 m / 900-1000 m / 1000-1100 m / 1100-1200 m / 1200-1300 m
Aire drainée	Pas de drainage / Léger ravinement / Ravine / Chenal secondaire / Chenal principal
Occupation du sol	Sol nu / Pelouse / Feuillus / Résineux
Présence/Absence de végétation	Absence / Présence

Age du peuplement	Végétalisation ancienne (av. 1982) Végétalisation ancienne (1982-1994) Végétalisation récente (1994-2021) Végétalisation pendant la période d'étude (2015-2021) Pas de végétation Dévégétalisation ancienne (1982-1994) Dévégétalisation récente (1994-2021) Dévégétalisation pendant la période d'étude (2015-2021)
--------------------------	---

Tableau 2 : Facteurs de contrôle et leurs modalités choisis pour tester leur rôle sur la variabilité de l'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

Les cartes d'exposition, la pente et l'altitude sont produites sur QGIS à partir du MNT de 2015 fournit par SINTEGRA. L'aire drainée est calculée sur ArcGIS Pro. Une fois chaque couche réalisée, des classes de facteurs topographiques sont définies. Pour la pente, un intervalle de 5° entre chaque classe est décidé afin de comprendre de façon assez fine quelle inclinaison de pente peut influencer les taux d'érosion. Pour l'altitude, un pas de 100 m est choisi. Enfin, après étude visuelle de l'aire drainée, 5 classes correspondants à des intensités de drainage sont délimitées.

Les facteurs écologiques Présence/Absence de végétation et Occupation du sol se basent sur la cartographie des types de végétation en 2015 à classe (Sol nu, Pelouse, Feuillus, Résineux, Ombre) qui a été réalisée par De Almeida (2023). Lors de son stage, Thomas De Almeida a utilisé les ortho-photo de l'IGN à résolution 50 cm, puis il a calculé l'indice NDVI. Il a ensuite produit une classification de la végétation en quatre classes (dénudé, pelouse, résineux, feuillus) sur la base du NDVI et d'un indice de texture « Energy ». Pour tous les facteurs, la classe « Ombre » est supprimée.

Pour le type d'occupation du sol les classes sont les mêmes que celles définies par T. De Almeida (2023) lors de la classification des images satellites (Annexe 1). Pour « présence/absence de végétation », 2 classes sont délimitées. Enfin, le dernier facteur portant sur les âges du peuplement est un peu plus complexe. Nous disposons des 5 années classifiées : 1982, 1994, 2012, 2015, 2021. L'image de 2012 est exclue car le taux d'ombre est trop important. Chaque image est classifiée en 2 classes qui correspondent respectivement à une absence ou une présence de végétation. Puis, avec la calculatrice raster, ce sont 8 classes qui sont définies et qui permettent de mettre en avant les dynamiques de végétalisation et devégétalisation très anciennes (1982) à récentes (2021).

2.2.2. Statistiques réalisées

L'ensemble des statistiques a été réalisé sous Rstudio. Il est important de préciser que les pixels de la carte d'érosion ne couvrent que 75 % du bassin. 25 % du bassin est classé en *nodata*. Cela correspond à des zones de végétations pour lesquelles le LiDAR 2021 n'avait pas produit de données sous les arbres. Ces zones sont exclues des traitements statistiques.

2.2.2.1. Statistiques descriptives

Avant de commencer les recherches de corrélation, on visualise les données. Pour chaque facteur, un histogramme de fréquence de chaque modalité est réalisé. Cela nous permet de savoir quelle est la modalité la plus représentée dans le bassin.

Ensuite, on visualise avec des *boxplot* la moyenne d'érosion selon les modalités de chaque facteur. Cela permet de faire émerger des tendances d'érosion.

2.2.2.2. Tests de corrélation

Une fois les statistiques descriptives réalisées, nous souhaitons observer les différences de corrélations entre les facteurs topographiques et les valeurs d'érosion. Pour cela, les valeurs non classées des facteurs topographiques sont utilisées. Le test de corrélation de Pearson est appliqué aux variables quantitatives (Annexe 4.1). L'analyse de corrélation mesure alors la force et la direction de la relation linéaire entre chaque variable.

2.2.2.3. Test de Kruskal-Wallis

Pour étudier la relation entre une variable quantitative (dépendante) et une variable qualitative (explicative), plusieurs tests existent. La variable érosion ne suit pas une loi normale, même après transformation, on ne peut donc pas réaliser une ANOVA. Nous choisissons de réaliser un test non paramétrique. Ce type de test permet d'interroger des données qui ne répondent pas aux hypothèses prédéfinies par les tests paramétriques (comme la loi de distribution normale). Comme alternative à l'ANOVA à un facteur, on peut prendre appui sur le test de Kruskal-Wallis qui base son analyse sur le rang des données en comparant les médianes des différents groupes. Il permet de repérer les différences significatives entre les groupes de la variable qualitative par rapport à la variable quantitative (Annexe 4.2).

Conditions :

1. La variable dépendante doit être continue, ordinale ou numérique ;
2. La variable indépendante doit avoir deux ou plusieurs groupes catégoriques indépendants ;
3. Les observations entre les groupes doivent être indépendantes.

Le test est réalisé pour chaque variable catégorielle. Si la p value < 0,05, le test est significatif. Cela signifie qu'il y a une relation entre les deux variables.

Ensuite, si le test est significatif, il est important de connaître la taille de l'effet (Eta-carré : η^2) de la variable explicative sur la variable dépendante (Ellis, 2010). Selon convention de Cohen, pour un $\eta^2 = 0.01 - 0.05$ l'effet est jugé faible. Un effet moyen se trouve entre $\eta^2 = 0.06 - 0.13$. Une taille d'effet important sera $\eta^2 > 0.14$ (Annexe 4.3).

2.3. Modèles linéaires généralisés

2.3.1. Construction des modèles

Un GLM peut se définir comme l'extension d'un modèle linéaire classique qui applique une fonction de lien entre les deux variables étudiées. Il est utilisé pour déterminer puis quantifier les effets d'une relation entre une variable réponse (dépendante) et une/des variables explicatives. A la différence du modèle linéaire simple, le GLM est peut-être utilisé quand la variable réponse n'est pas uniquement de type numérique continue et il n'est pas soumis à des hypothèses de validation des résultats (indépendance des résidus, loi normale, homogénéité) (Crawley, 2013).

Les modèles linéaires généralisés reposent sur 3 propriétés :

1. **Un prédicteur linéaire** : les réponses prédites le seront à partir d'une combinaison linéaire des variables prédictives choisies.
2. **Une fonction de lien** : les valeurs prédites sont obtenues par transformation des valeurs observées.
3. **Une structure des erreurs** : C'est la famille de distribution des erreurs, à chaque fonction de lien correspond une structure d'erreur. Il existe plusieurs fonctions de lien et de structures d'erreur selon le type de variable réponse utilisée.

Type des réponses (et des erreurs)	Domaine de définition des réponses	Distribution des erreurs (et des réponses)	Nom de la fonction de lien	Fonction de Lien	Fonction de la moyenne	Fonction de la variance
Quantitatif continu	Réel ]$-\infty$; $+\infty$[	Gaussienne	Identité	$\sum_{j=1}^p x_{ij}\beta_j = \mu$	$\mu = \sum_{j=1}^p x_{ij}\beta_j$	$var(y_i) = cste$
Comptage	Entier [0; $+\infty$[	Poisson	Log	$\sum_{j=1}^p x_{ij}\beta_j = \ln(\mu)$	$\mu = \exp\left(\sum_{j=1}^p x_{ij}\beta_j\right)$	$var(y_i) = \mu$
Binaire (oui/non)	Entier [0; 1]	Binomiale	Logit	$\sum_{j=1}^p x_{ij}\beta_j = \ln\left(\frac{\mu}{1-\mu}\right)$	$\mu = \frac{1}{1 + \exp\left(-\sum_{j=1}^p x_{ij}\beta_j\right)}$	$var(y_i) = \mu \frac{(n-\mu)}{n}$

Tableau 3 : Différents types de glm. Source : DellaData.com

Pour cette étude, ce sont des modèles linéaires généralisés de type gaussiens qui sont réalisés car la variable réponse (l'érosion) est de type quantitatif continu. Pour juger quel est le modèle de régression le mieux ajusté aux données, on regarde le critère d'information d'Akaike (AIC). Plus la valeur de l'AIC est basse, mieux le modèle est ajusté aux variations de la variable réponse.

Enfin, ce type de modèle peut être utilisé pour prédire les valeurs d'une seule variable réponse à partir d'une ou plusieurs variables prédictives. S'il y a plusieurs variables prédictives, celles-ci peuvent être jointes par l'opérateur « + ». L'opérateur spécifie que la variable réponse est expliquée par la variable prédictive 1 et la variable prédictive 2 mais sans interactions entre elles. Des tests entre les différentes variables sont réalisés afin de trouver le modèle le mieux adapté aux données (Annexe 4.4).

Dans un premier temps, on a construit des modèles à une seule variable, puis on a combiné plusieurs variables explicatives pour construire un modèle qui explique au mieux les données.

2.3.2. Validation des modèles

Pour connaître la fiabilité des résultats des modèles linéaires généralisés, l'étape de validation est nécessaire (Figure 13). Le tableau de données est repris puis séparé en deux sous-échantillons égaux. Un échantillon sert à l'entraînement et l'autre à la validation. Les modèles linéaires généralisés sont générés à partir de l'échantillon d'entraînement. Ensuite, ce modèle est appliqué à l'échantillon de validation. Les valeurs d'érosion prédites permettent ainsi de connaître le bon ajustement du modèle par rapport aux valeurs réelles observées. Enfin, l'erreur moyenne quadratique est calculée. Elle mesure la moyenne des carrés des erreurs, donnant une idée de l'écart entre les valeurs observées et prédites.

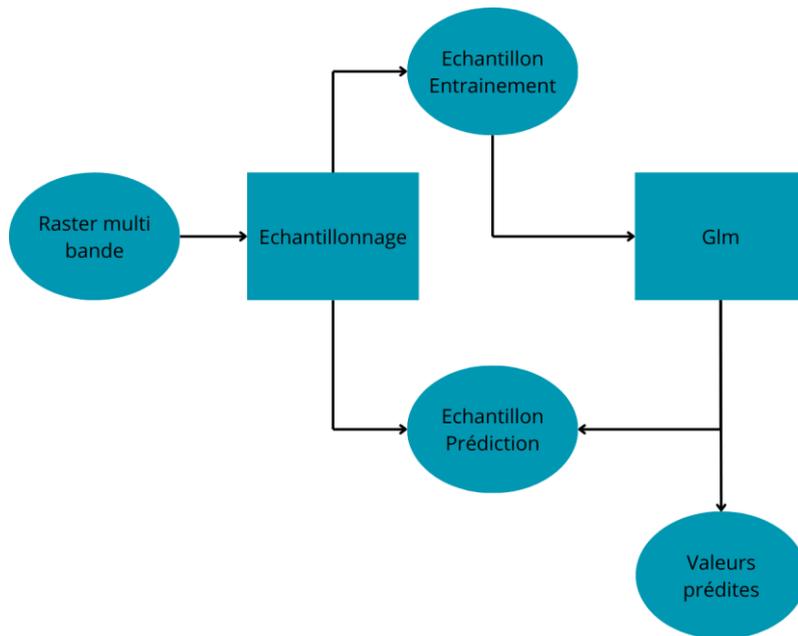


Figure 13 : Schéma méthodologique de validation des modèles linéaires généralisés pour l'identification des facteurs qui influent sur les dynamiques d'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

2.4. Recherche d'une potentielle influence des facteurs sur l'évolution de la végétation

2.4.1. Pré-traitements

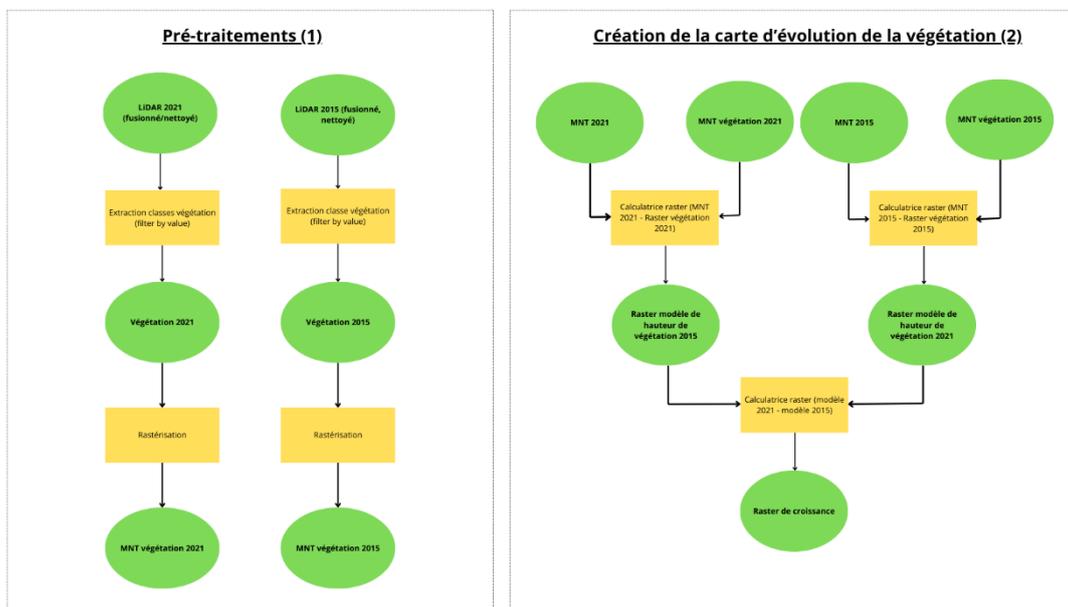


Figure 14 : Schéma méthodologique de la création d'un raster de croissance de la végétation entre 2015 et 2021 dans le bassin versant du Laval à partir de données LiDAR

Pour étudier les effets de l'érosion sur la végétation et obtenir une carte de la croissance de la végétation entre 2015 et 2021, comme dans la sous-partie précédente, une phase de pré-

traitements est nécessaire (Figure 14). Sous Cloud Compare, les nuages LiDAR fusionnés et nettoyés sont repris (Figure 7), puis, les points correspondant à la végétation sont isolés. Dans le nuage de 2015, il n'y a qu'une seule classe de végétation, le nuage ayant déjà été prétraité (IRSTEA & Sintégra, 2015). Pour le nuage de 2021, ce sont 3 classes qui sont extraites. En effet, les nuages LiDAR provenant de la campagne LIDAR HD de l'IGN, la végétation est divisée en 3 classes en fonction de la hauteur par rapport au sol (IGN, 2023) :

- végétation basse : entre 0 et 50 cm ;
- végétation moyenne : entre 50 cm et 1 m 50 ;
- végétation haute : < 1 m 50.

Une fois les points végétations extraits des deux nuages, ceux-ci sont rastérisés à une résolution de 2 mètres. Cette résolution est choisie pour qu'il n'y a pas une trop grande part de zones sans informations et que des statistiques puissent être réalisables. On obtient alors un MNT et où l'information contenue dans chaque pixel représente l'altitude moyenne de la végétation pour une surface de 4m².

2.4.2. Elaboration du raster de croissance

Dans un second temps, sous QGIS, des modèles de hauteur de la végétation sont créés (Figure 14). D'abord les MNT de 2015 et 2021 sont rééchantillonnés à la même résolution que les MNT végétation. Puis, chaque MNT végétation est soustrait au MNT originel de la même année. Deux modèles de hauteur de la végétation sont alors obtenus, un pour 2015 et un pour 2021. Volontairement, les valeurs comprises entre -0,30 m et 0,30 m sont supprimées pour réduire les bruits potentiels. Enfin, le modèle de hauteur de 2015 est soustrait au modèle de hauteur de 2021. Un raster de croissance de la végétation entre 2015 et 2021 est alors produit. Dans chaque pixel est contenu l'information sur la hauteur moyenne de la végétation pour une surface de 4m².

2.4.3. Statistiques et recherche de corrélation entre la croissance et les facteurs

Pour la recherche de facteurs de contrôle pouvant influencer la croissance de la végétation, les facteurs choisis sont similaires à la partie précédente. Les 5 facteurs abiotiques sont : la pente, l'altitude, l'exposition, l'aire drainée et l'érosion. Pour les facteurs biotiques, l'âge du peuplement et l'occupation du sol vont être étudiés.

Avant tout chose, tous les rasters correspondants aux facteurs sont rééchantillonnés à une résolution de 2 mètres pour être en accord avec la résolution de la carte de croissance de la végétation. Ensuite, comme dans la partie précédente, les rasters sont fusionnés pour créer un raster multibandes à 10 bandes. Ce raster multibandes est converti sous R en data frame. D'abord des statistiques descriptives sont réalisées, dans l'objectif d'étudier la répartition des valeurs de croissance ainsi que la valeur moyenne de cette croissance selon les différentes modalités de chaque facteur. Ensuite, la corrélation entre les variables quantitative est testée grâce au test de corrélation de Pearson (cf.2.2.2.2) . Enfin, les variables quantitatives sont classées et le test de Kruskal et Wallis est réalisé (cf.2.2.2.3).

3. Résultats

3.1. La carte de l'érosion spatialisée entre 2015 et 2021

D'abord, l'analyse réalisée sur les trois zones stables situées aux abords du bassin versant du Laval selon la même méthodologie que pour les deux nuages permet de confirmer leur bon alignement. En effet, la distance moyenne calculée entre les 3 zones stables identifiées (des toits de cabanes) est de 4 millimètres (Figure 15). Nous pouvons faire l'hypothèse que les 4 millimètres de différences peuvent être dus soit à la différence de densité entre les deux nuages soit au développement de légère mousse sur les toits entre 2015 et 2021.

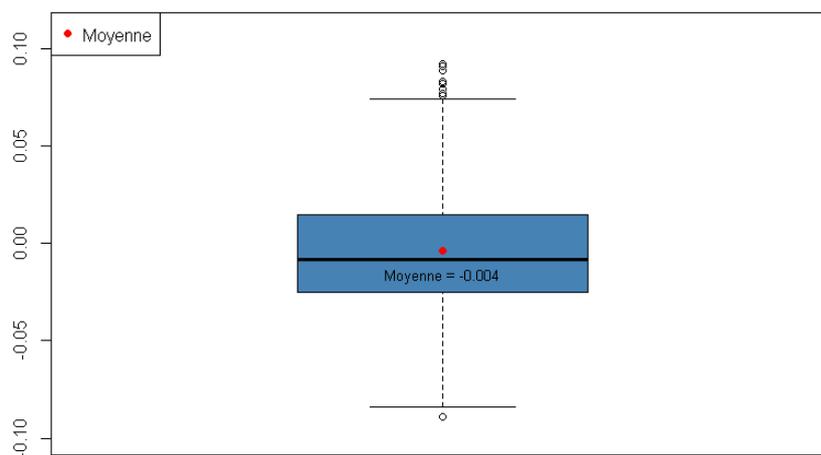


Figure 15 : Boxplot de la distance moyenne calculée pour les zones stables. ©J.Pellerano

Ensuite, le bon alignement des nuages confirmé, la carte des taux d'érosions peut être décrite (Figure 16). La distance d'altitude entre les deux nuages après rastérisation du nuage résultat à 50 cm est de -0,067 m entre 2015 et 2021. Une fois les distances recalées selon les valeurs observées par la station hydro sédimentaire, on ne remarque quasiment pas de différence pour les valeurs extrêmes, le recalage étant de l'ordre du centimètre. Le dépôt maximal de matière est donc de 2,74 mètres et l'ablation maximale de -2,86 mètres avec un écart type de 0,09 m (9 millimètres). La valeur moyenne d'ablation est de 0,039 mètre entre 2015 et 2021, donc chaque année, l'ablation annuelle du bassin est de 6 millimètres (Annexe 5) comme l'a mis en évidence la thèse d'Ariagno (2022).

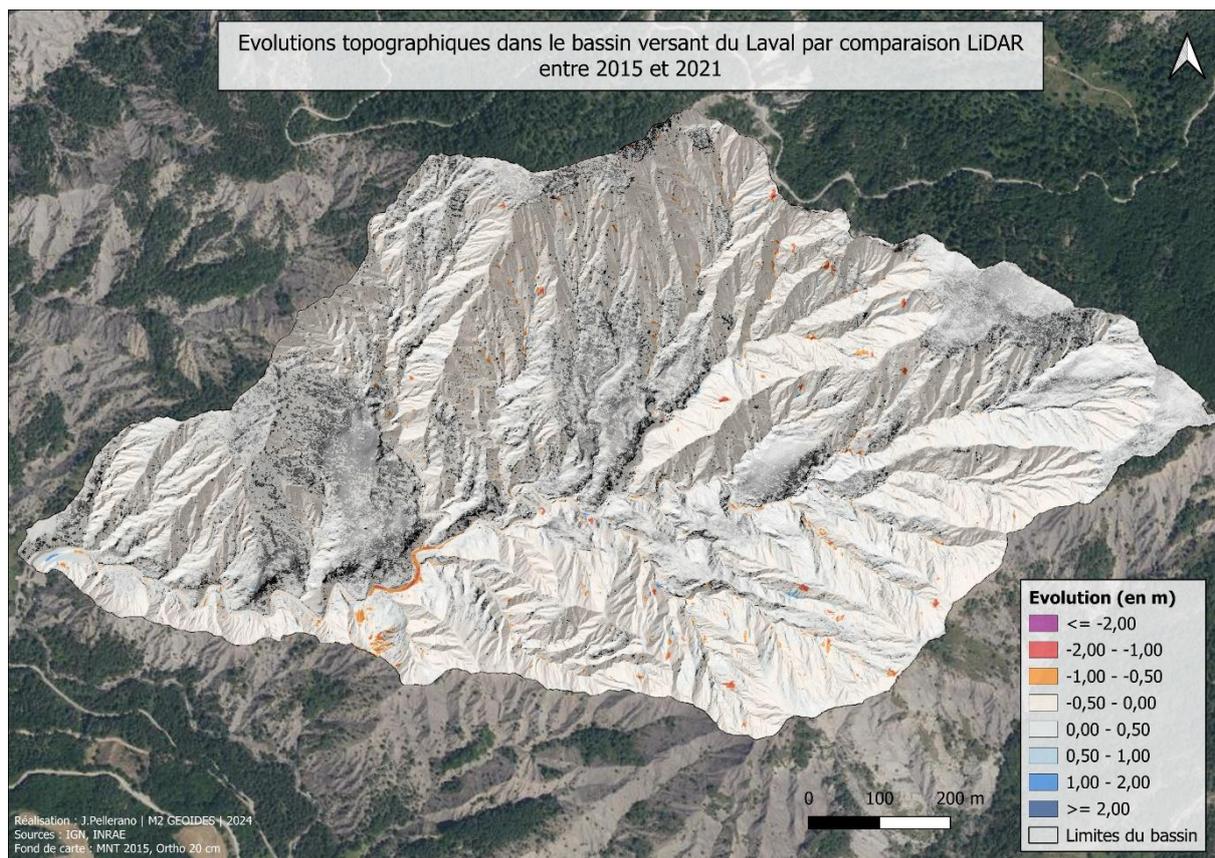


Figure 16 : Cartographie des évolutions topographiques dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021.

A l'échelle du bassin versant, on remarque une tendance globale à l'érosion. En effet, 83 % des pixels ont des valeurs inférieures à 0. Cela correspond à environ 0,5 km² pour un bassin versant de 0,8 km². Au sud ouest du bassin est visible une zone assez étendue où les valeurs d'érosions sont conséquentes. Cela correspond au glissement de terrain d'environ 4000 m² qui est survenu durant l'hiver 1998-1999. Ce glissement nommé « La coulée » a été provoqué par la présence de diaclases et le pendage (Mathys, 2006). La carte montre que le glissement de terrain est toujours en léger mouvement. Au pied de ce glissement, une forte érosion est visible dans le lit principal du Laval, entre 800 et 900 mètres d'altitude, en aval des versants fortement inclinés (jusqu'à 90°). En fait, lors du glissement, des matériaux ont obstrué une partie du chenal, puis les crues ont creusées un passage au pied du glissement de terrain. Ce que l'on voit dans la carte correspond donc à la vidange du stock de sédiments qui étaient piégés dans le chenal.

Hormis ce glissement emblématique du bassin, le plus gros mouvement de terrain que l'on peut observer est situé au sud du bassin versant et mesure environ 123 m². La mesure de la surface approximative du dépôt de matière à l'aval correspond à la surface ayant glissée dans les dépôts et les ravines. Sur le haut de la crête, la zone de départ présente une ablation maximum de 2,6 mètres. Pour le reste du glissement, l'épaisseur ayant glissée varie de 50 centimètres à 1 mètre. De plus, plusieurs petits glissements de terrains (d'une centaine de mètres carrés) sont bien visibles au nord est et au sud du bassin. Si l'on regarde plus finement, les glissements prennent source, en majorité, sur les crêtes et zones hautes des versants, là où la pente est forte, généralement entre 45 et 75°. Cela peut être dû à l'impact de l'érosion hydrique

qui dénude les zones et les fragilisent. Une logique d'ablation/dépôt est bien visible car sous de nombreux glissements, on remarque une accumulation de matière avec des valeurs de pixels supérieures à 0. Les zones de dépôts importants sont majoritairement concentrées en aval des glissements, mais aussi dans les zones de végétation où le dépôt varie généralement de quelques millimètres à un centimètre. Au total, 17% des pixels sont concernés par une dynamique de dépôt (environ 0,1 km²).

3.2. Recherche des facteurs d'influence de la variation de l'érosion

3.2.1. Résultat des statistiques descriptives

3.2.1.1. Facteurs abiotiques

L'analyse entre les taux d'érosions moyens selon les modalités de chaque facteur a pu faire ressortir des premières tendances. On remarque que l'érosion est très forte dans les pentes entre 0 et 5°. (Figure 17). L'ablation moyenne est moins élevée dans les pentes entre 5 et 10° avec même du dépôt entre 10 et 30°. Mais, dans les pentes plus abruptes, entre 45 et 55° (21% de la surface du bassin), l'ablation moyenne atteint de 6,4 cm entre 2015 et 2021.

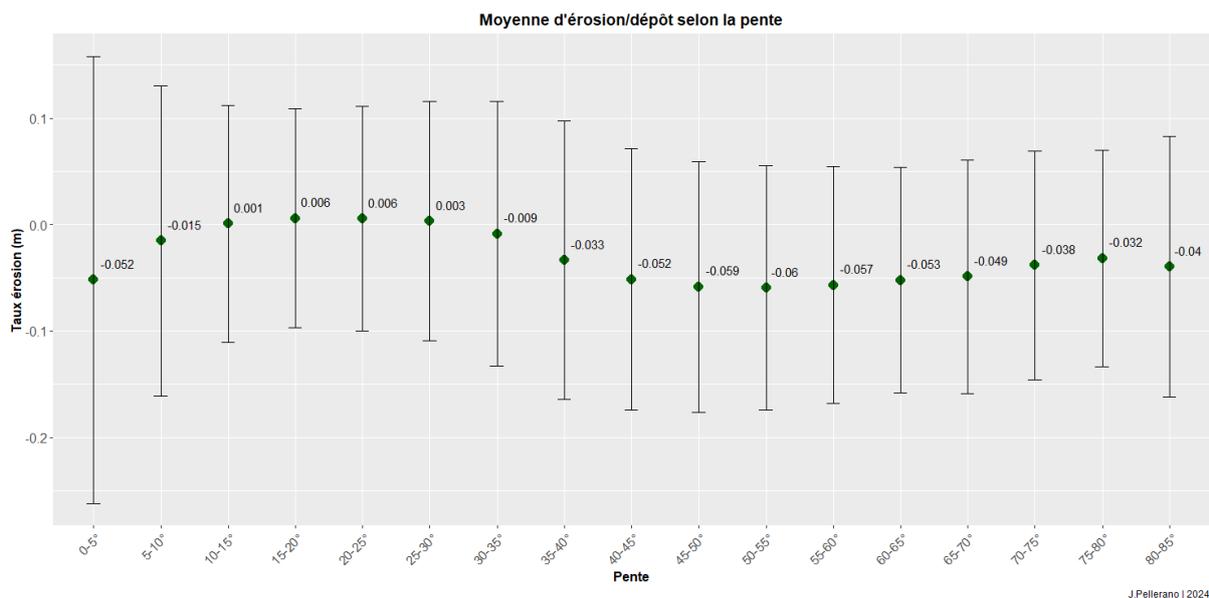


Figure 17 : Moyenne d'érosion selon les classes de pente entre 2015 et 2021 dans le bassin versant du Laval

Par ailleurs, on remarque des différences selon les classes d'altitude. Entre 1000 et 1100 mètres (ce qui représente 28 % du bassin), la moyenne d'ablation est de 4,8 cm. En outre, 49 % du bassin se trouve entre 900 et 1000 mètres pour une ablation moyenne de 3,3 cm (Annexe 6). Pour le facteur drainage, aucune différence significative entre l'absence de drainage et les zones de ravine n'est observée. En revanche, dans chenal principal, l'ablation moyenne est très forte (9 cm) (Annexe 6). Enfin, pour l'exposition, les valeurs tendent à une ablation moyenne entre 3 et 3,7 cm pour toutes les orientations de versants excepté pour les expositions nord-est et est où celle-ci est un peu plus importante (5 cm) (Annexe 6).

3.2.1.2. Facteurs biotiques

L'analyse des facteurs biotiques met en évidence une érosion plus importante lorsqu'il y a une absence de végétation. En effet, lorsqu'il y a absence de végétation (facteur absence/présence de végétation) ou que le type d'occupation du sol est classifié comme sol nu, l'érosion moyenne est de 7 cm entre 2015 et 2021. A l'inverse, dans les zones où la végétation est présente, on observe plutôt du dépôt sédimentaire (Annexe 7). Mais c'est le facteur portant sur l'âge de la végétation qui nous donne plus d'informations. Dans les zones qui se sont dévégétalisées entre 1982 et 2021, on retrouve plutôt une tendance à l'érosion. Les secteurs dévégétalisés depuis plus longtemps présentent une ablation moyenne plus importante que les secteurs récemment dévégétalisés. Par exemple, les zones dévégétalisées depuis plus longtemps, entre 1982 et 1994 par exemple, ont un taux d'érosion 2,5 fois supérieur aux zones dévégétalisées entre 2015 et 2021. A l'inverse, dans les zones revégétalisées, on retrouve une dynamique de dépôt d'environ 20 cm à l'exception de la période d'étude 2015-2021 où l'ablation moyenne dans le bassin est de 3 mm (Figure 18).

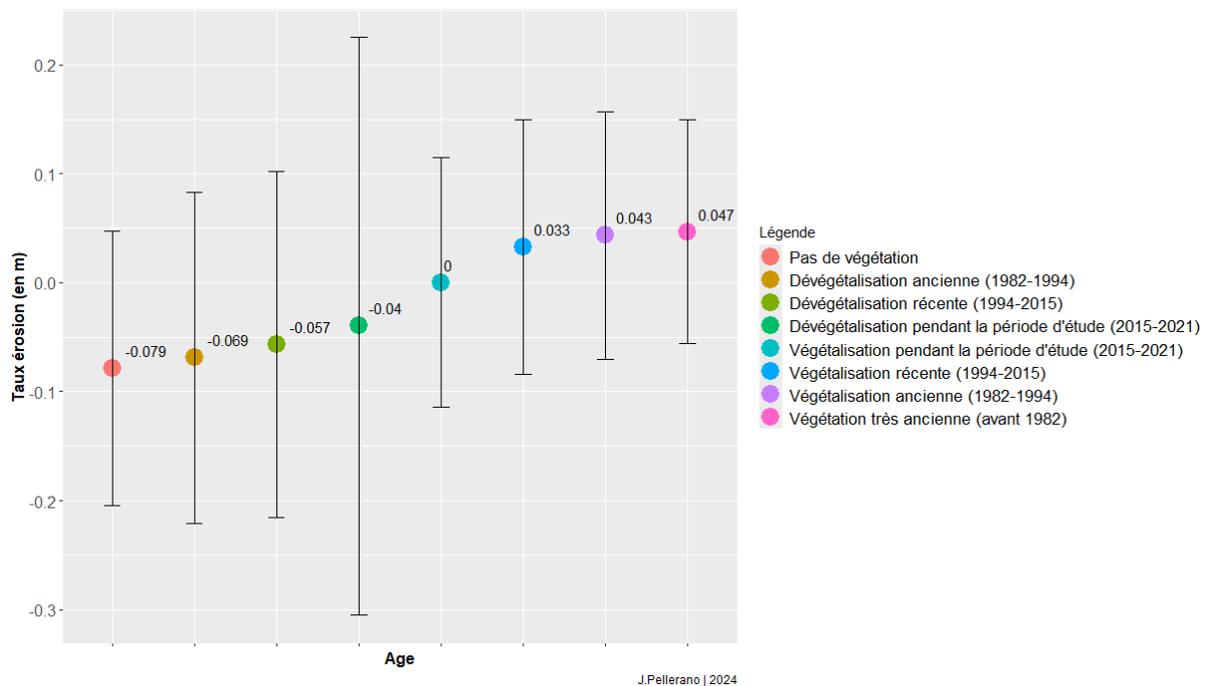


Figure 18 : Moyenne d'érosion/dépôt selon la dynamique de la végétation entre 1982 et 2021 dans le bassin versant du Laval

3.2.2. Résultats des tests de corrélation

Ensuite, le test de corrélation entre les variables quantitatives topographiques et l'érosion démontre qu'un facteur topographique n'influent pas à lui seul réellement sur l'évolution topographique du bassin versant du Laval (Figure 19). La seule variable démontrant un faible lien avec une variation de surface est la pente avec un coefficient de corrélation négatif ($R = -0,18$). Cela signifie que lorsque la pente augmente, l'érosion augmente aussi. Une autre tendance se dégage, c'est qu'il y a une très faible corrélation entre l'érosion et l'aire drainée. Hormis les relations à l'érosion, on remarque que certains facteurs sont liés entre eux. La pente et l'altitude sont légèrement corrélées ($R = 0,18$).

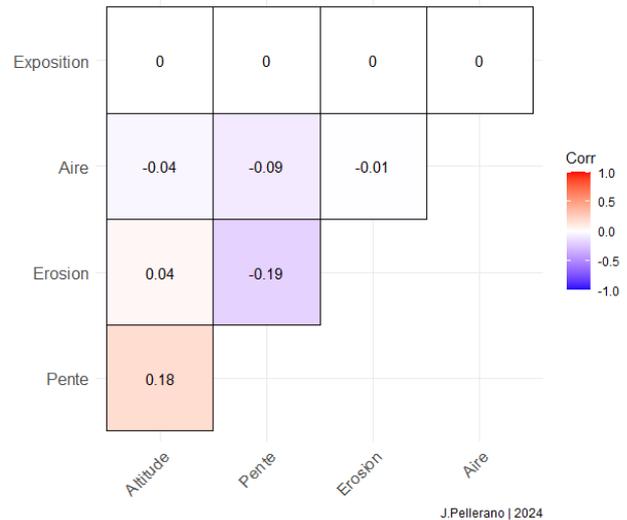


Figure 19 : Matrice de corrélation entre les variables quantitatives topographiques dans le bassin versant du Laval

Puis, le test de Kruskal et Wallis qui permet d'étudier la relation entre la variable érosion et les différents facteurs (qualitatifs) ainsi que l'effet que chaque facteur peut avoir sur la variance de l'érosion nous permet de confirmer les liens entre les variables (Annexe 8). Les tests réalisés entre les différents facteurs classés et l'érosion sont tous significatifs, car la p-value est inférieure à 0,05. Il y a donc une relation avérée entre les variables testées, mais comme nous avons pu le voir précédemment, l'intensité du lien est variable. Plus précisément, il y a une différence significative entre les différents niveaux de la variable indépendante (facteurs) et de la variable dépendante (érosion) et que ceux-ci ont un impact sur la variation de la variable dépendante. Les résultats de taille d'effet (ou η^2) sur les facteurs topographiques classés donnent la même tendance que pour les tests de corrélation présentés précédemment. L'effet de la pente sur la variance de l'érosion est modéré ($\eta^2 = 0,093$). Pour les autres facteurs topographiques, l'effet est considéré comme faible. Pour les facteurs écologiques, on remarque que la taille d'effet est forte et notamment pour le facteur Age ($\eta^2 = 0,301$).

3.3. Construction de modèles linéaires généralisés pour la prédiction de l'érosion

Les modèles linéaires généralisés permettent d'étudier quel facteur de contrôle influence le plus la variation de l'érosion. Le modèle explique comment la variation des changements topographiques du Laval est liée aux différents niveaux de la variable prédictive (facteurs).

Le facteur ayant le plus d'influence sur la variance de l'érosion est l'âge, mais, combiné avec la pente on remarque que c'est ce modèle qui est le mieux adapté aux données. En effet, après la création d'un modèle pour chaque variable prédictive, il apparait que les deux modèles qui ont l'AIC la plus faible sont ceux qui impliquent la pente (AIC = -2793236) et l'âge (AIC = -3135400) (Annexe 9). On se demande alors s'il y a une corrélation entre les âges de peuplement et la pente. La boîte à moustache ci-dessous (Figure 20) met en avant la présence des zones dé

végétalisées et dépourvues de végétation dans des pentes moyennes supérieures à 38°. Le test de Chi-deux de Pearson révèle que ces deux facteurs sont corrélés l'un à l'autre (p -value < 2.2^e-16).

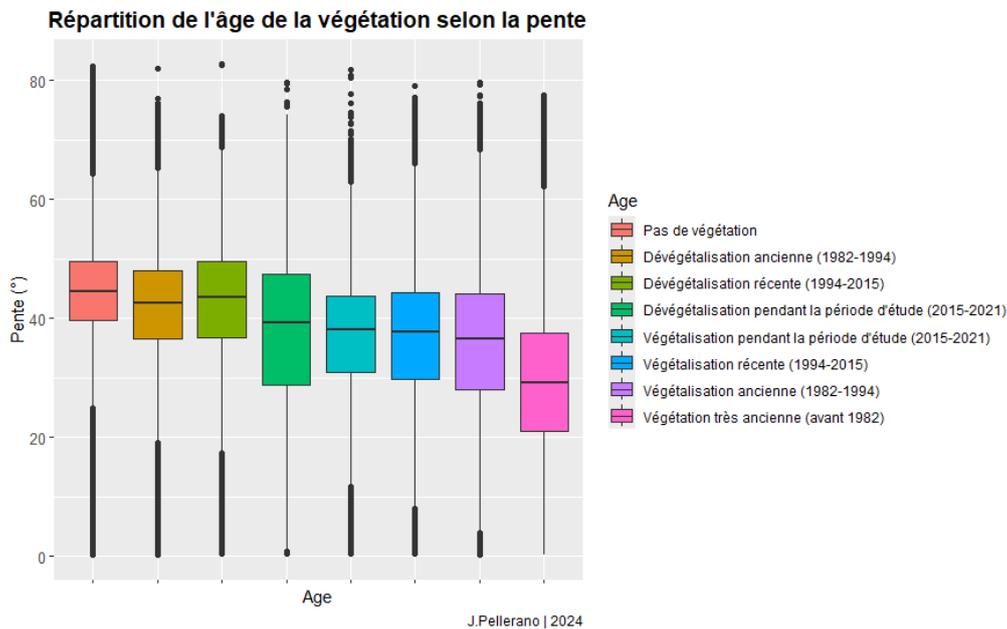


Figure 20 : Répartition de l'âge de la végétation selon la pente dans le bassin versant du Laval

L'altitude est le 3^{ème} facteur avec une AIC des plus faibles (AIC = -2725983). De même, les glm comprenant l'exposition et l'aire ne sont pas très concluants. Ces variables peuvent donc être utilisées en complément d'autres variables mais pas seules. Pour les facteurs écologiques les AIC de l'absence/présence de végétation et de l'occupation du sol sont plus élevées que pour l'âge des peuplements. Ce qui sous-tend un ajustement moins précis avec les données.

Finalement, les résultats des modèles linéaires généralisés avec l'opérateur « + » qui permet de construire des modèles multivariés sans effet d'interaction entre les différentes variables nous montre qu'en regroupant la pente et l'âge dans un même modèle, la valeur de l'AIC continue de diminuer (AIC = -3147312).

Enfin, pour la validation de ce modèle, les deux modèles de prédiction des valeurs d'érosion selon l'âge des peuplements et les classes de pente permettent d'estimer une Erreur Quadratique Moyenne d'1 cm (Figure 21, Annexe 9.2). La validation du modèle additionnant les deux variables affiche aussi une MSE d'1 cm. Il est donc possible d'avancer que ce modèle explique et peut prédire la répartition spatiale de l'érosion dans le bassin versant du Laval.

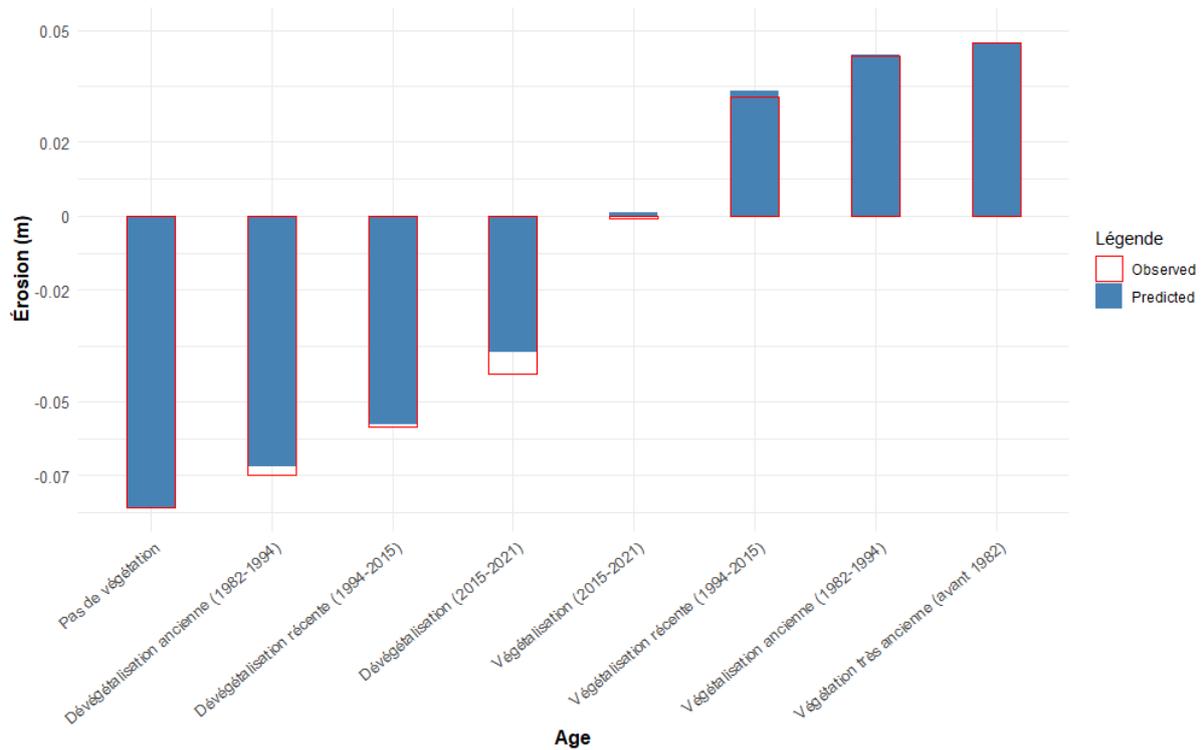


Figure 21 : Observation vs prédiction des valeurs de l'érosion selon l'âge de la végétation dans le bassin versant du Laval

3.4. Cartographie de la croissance de la végétation entre 2015 et 2021

La carte de croissance de la végétation du bassin versant du Laval permet d'observer la dynamique globale de la végétation entre 2015 et 2021. Les pixels vert clair à vert foncé montrent une croissance de la végétation. A l'inverse, les pixels jaunes à rouge montrent une croissance négative. Ces pixels peuvent correspondre à des arbres ayant pu tomber. Par exemple, le rond violet en bas de la carte correspond à un arbre avec une canopée développée ayant chuté entre 2015 et 2021. A première vue on remarque qu'il y a une majorité de pixels verts, traduisant une dynamique globale de croissance de la végétation entre 2015 et 2021. La distribution des valeurs de croissance montre une distribution plutôt symétrique et une érosion moyenne de 52 centimètres. La croissance maximale est de 16 mètres et la disparition maximale de 17 mètres (Figure 22).

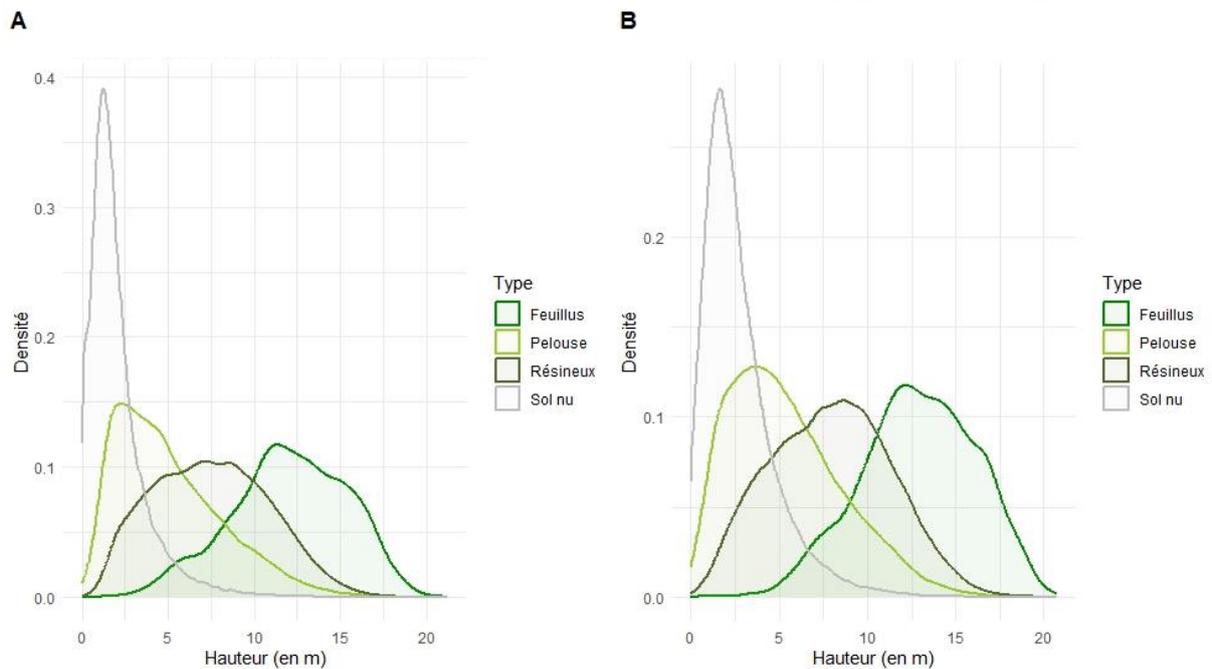


Figure 23 : Diagrammes de densité de distribution des hauteurs en fonction du type d'occupation du sol. A gauche : 2015 / A droite : 2021

Aussi, les résineux ont en moyenne cru de 53 centimètres et les pelouses de 18 centimètres. Dans les zones classées comme sol nu, la croissance moyenne de la végétation est de 66 centimètres (Annexe 10.2). Enfin, l'âge de la végétation donne de bonnes indications sur la dynamique de croissance. Naturellement, on observe une croissance négative dans les zones dites dévégétalisées. Dans les zones végétalisées et où la végétation était déjà présente avant 1982, la tendance est plutôt à la croissance comme le montre la figure ci-dessous :

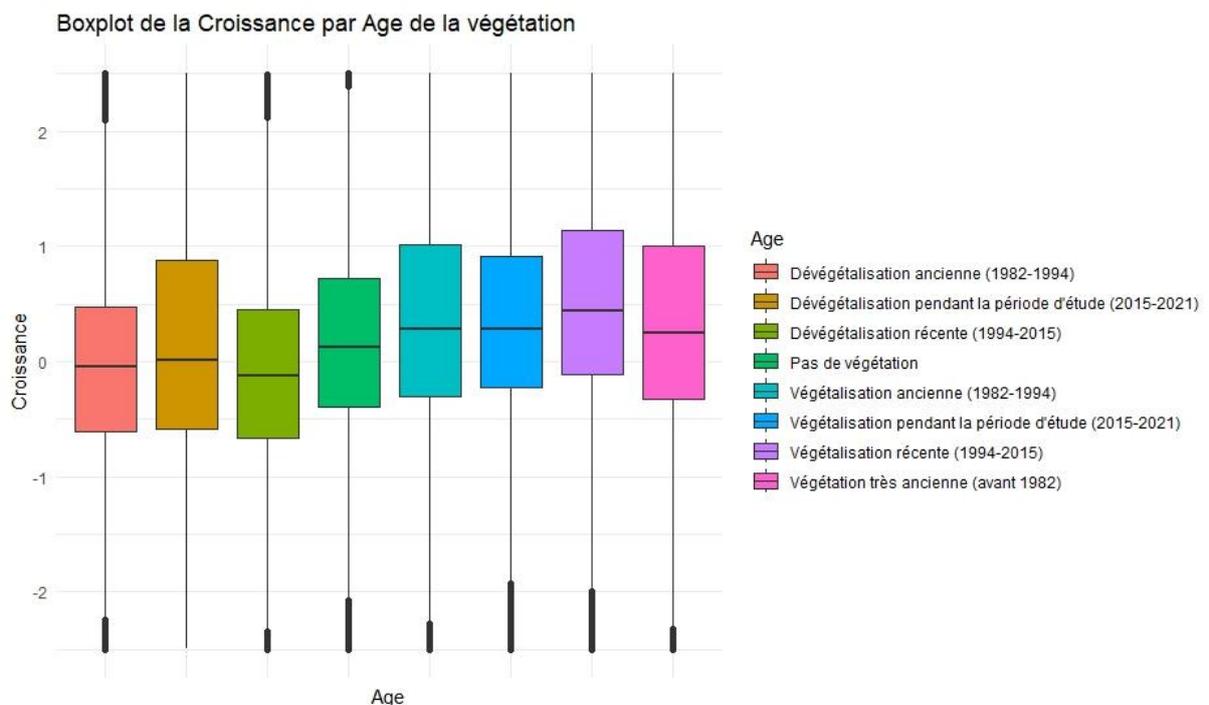


Figure 24 : Boxplot de la croissance moyenne de la végétation selon l'âge de la végétation dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

Les tests de corrélation entre la variable croissance des arbres et les facteurs ne sont pas très concluants. Le test de Pearson pour la recherche de corrélation entre les variables quantitatives démontre qu'il n'y a quasiment aucune corrélation entre les facteurs topographiques et la croissance (Annexe 11.1). Une fois les valeurs quantitatives classées, le test de Kruskal et Wallis met en avant qu'il n'y a pas corrélation significative entre les variables qualitatives et la croissance des arbres (Annexe 11.2). L'érosion n'exerce donc aucune influence sur la variation de la croissance de la végétation entre 2015 et 2021. Seule l'altitude présente une très faible corrélation négative avec la croissance ($R^2 = -0,1$).

4. Discussion

4.1. Limites et apports de la méthodologie liée à l'utilisation du LiDAR pour l'étude des taux d'érosion

Premièrement, les dynamiques d'ablation/dépôt du terrain sont d'un ordre de grandeur centimétrique, donc l'étude de l'évolution de la surface nécessite une grande précision dans la mesure des différences d'élévations entre deux dates. La méthode de comparaison LiDAR pour l'étude de l'érosion ou de la croissance de la végétation est globalement efficace mais reste à améliorer. Dans un terrain très escarpé et muni de nombreuses ravines, il est difficile d'aligner parfaitement les deux nuages à comparer et le recalage avec les données de terrain est nécessaire. En effet, l'obstacle majeur lors de la phase d'alignement est que les zones stables ne sont ni assez nombreuses ni bien réparties en tous points du bassin. La méthode utilisée est une solution mais ce n'est pas la méthode la plus précise. L'utilisation de l'algorithme M3C2 (*Multiscale Model to Model Cloud Comparison*) présenté par Lague et al. (2013) qui garde une représentation 3D de l'objet à comparer est une des méthodes les plus précises. Mais, dans cette étude, du fait de la différence de densité entre les nuages et de la difficulté à les aligner, les résultats n'étaient pas concluants. Une autre méthode utilisée est la comparaison entre deux MNT à partir des deux nuages de points. Mais, la différence de densité entre les deux nuages représente un réel obstacle. Une comparaison de cette manière n'est pas vraiment possible car les résultats seraient moins précis du fait de la différence de densité de ces nuages.

Aussi, la densité des nuages de points présentant un gros écart, il peut y avoir des erreurs localisées dans le résultat de la variation de surface pour l'étude de l'érosion, du fait que le nuage de 2021 a légèrement moins de points sous les arbres que le nuage de 2015 (1,3 million contre 1,7 million). Cela peut être une source d'incertitude dans les résultats obtenus. De plus, lors de la rasterisation du nuage de comparaison à 50 cm de résolution, les pixels ont pu être générés sur 75 % de la totalité du bassin versant. Cela peut aussi représenter un biais par rapport aux résultats obtenus. Les 25% restants, qui se trouvent dans les zones végétalisées, aurait pu influencer le résultat obtenu lors de la comparaison, et peut-être aurait été t-il plus proche des valeurs mesurées à l'exutoire.

Le nuage résultat des taux d'érosion étant basé sur la densité du nuage de points de 2015, le plus dense, il n'est pas possible de faire des statistiques directement sous R du fait que celui-ci est composé de 15 millions de points. Le raster multi bande utilisé pour traiter les données sur R est composé d'environ 6,2 millions de pixels. Travailler donc à l'échelle de tout un bassin versant est possible mais les possibilités de traitement peuvent être limitées. Par exemple, est impossible de réaliser certains graphiques et tests directement sur l'ensemble des données (réalisation de nuage de point, test de shapiro-wilk).

Par ailleurs, les résultats peuvent être aussi influencés par les dates d'acquisition des deux nuages LiDAR. Le vol du nuage de 2015 a été réalisé le 7 avril, peu après la saison d'hiver et le vol de 2021 entre mi-juin et mi-juillet. On peut faire l'hypothèse que les sédiments ont pu être produits par les mécanismes de désagrégation du sol durant l'hiver. Ces sédiments sont rapidement mobilisés par les précipitations avec un pic d'export en juin (Rovéra & Robert, 2005, Ariagno, 2022a). Si l'acquisition avait été prise en fin d'automne, après que la majorité des sédiments produits cette année aient été exportés, peut-être que le résultat de l'érosion moyenne en 5 ans n'aurait pas été le même.

Enfin, la carte d'évolution de la surface du bassin entre 2015 et 2021 met en avant une tendance globale à l'ablation. Nous pouvons remarquer des glissements, mais nous n'avons pas d'indication sur la date à laquelle ils auraient pu survenir. On sait que les cumuls annuels de volumes exportés sont variables selon les années (Annexe 2), et il est possible qu'une part de cette variabilité soit liée à la survenue de glissements. Pour explorer cette hypothèse, il faudrait donc trouver et expérimenter une méthode qui permettrait de connaître la période à laquelle les glissements surviennent, ce qui pourrait aider à comprendre d'avantage le comportement érosif du bassin.

4.2. Le rôle des facteurs dans la variation de l'érosion à l'échelle spatiale

Dans cette étude différents facteurs topographiques et écologiques ont été testés. D'abord, dans les statistiques descriptives, on remarque que la plupart des écarts types sur les taux d'érosion sont importants, ce qui signifie que les données sont fortement dispersées autour de la moyenne (Figure 17 ; Figure 18 ; Annexe 6 ; Annexe 7). Une telle dispersion indique donc une incertitude élevée quand aux valeurs moyennes de dépôt/ablation présentées dans ces graphiques. Pour chaque modalité de chaque facteur, il y a une grande distribution des données, ce qui soulève des questionnements. Cela peut être une incertitude dans le calcul de la distance entre nuages de points liée à la grande différence de densité entre les nuages de points mais aussi une variabilité naturelle intrinsèque aux données.

Ensuite, de précédentes recherches avaient mises en évidence le rôle de l'exposition, des pentes et dans une moindre mesure de l'altitude dans la variance des taux d'érosion (Descroix et al., 2002). Mais lors de la recherche de corrélation, nous avons vu que les facteurs topographiques n'ont pas réellement d'influence, seuls, sur la variance de l'érosion hormis la pente à qui elle est légèrement corrélée ($R = 0,17$). Dans notre cas, cela peut s'expliquer de plusieurs façons. D'une part, le fait de garder dans nos analyse la présence du chenal principal qui est fortement érodé par les débits des écoulements peut avoir un impact sur les résultats. D'autre part, dans ce même chenal, on remarque que la vidange progressive du stock sédimentaire du glissement de terrain de 1999, qui est situé dans des pentes entre 0 et 5°, doit aussi influencer sur les résultats (cf. 3.2.1). Mais aussi, au vu de la forme de la relation entre pente et taux d'érosion (Figure 17), peut être qu'un modèle linéaire n'est pas adapté pour tester la corrélation avec la pente et qu'il faudrait tester d'autres types de modèles.

De plus, ce sont surtout les facteurs écologiques qui montrent un effet sur les taux d'érosion. Ceci pourrait s'expliquer par une stabilisation du sol par les racines, comme l'avaient déjà démontré plusieurs recherches (Rey et al., 2004 ; Burylo, 2010). Les statistiques et notamment les modèles linéaires généralisés ont montré que l'âge des peuplements est le facteur qui influe le plus sur la variation de l'érosion. De façon générale, on sait que l'érosion diminue quand la couverture végétale augmente (Rey et al., 2004). Mais l'âge semble être une variable déterminante dans la régulation des taux d'érosion. Il semble donc y avoir un temps de réponse du système érosif. En effet, on remarque que dans les zones qui se sont végétalisées entre 2015 et 2021, l'érosion est encore active. Nous pouvons faire l'hypothèse que, pour que les marnes se stabilisent et que la dynamique inverse s'actionne, plusieurs années sont nécessaires pour que les racines des végétaux se développent et aident à la fixation du sol. D'après nos observations sur le terrain, le processus de colonisation se fait d'abord par des jeunes conifères. Une fois ceux-ci installés, des herbacées se développent à leur pied ce qui permet une meilleure

stabilisation du sol. Aussi, au fur et à mesure des années, le couvert végétal se diversifie, les strates se multiplient, la canopée est donc plus importante. Cela engendre une meilleure interception de la pluie et une diminution du ruissellement (Rey et al., 2004). De plus, le carbone organique s'accumule dans le sol lorsque qu'un arbre grandit au fur et à mesure des années, ce qui augmente la stabilité des agrégats du sol (Erktan et al., 2014). La répartition joue aussi un rôle sur le ruissellement. Une répartition homogène de la végétation permet de diminuer le ruissellement (Ionesco, 1964). Il serait pertinent de creuser ces pistes. Le stage De Almeida (2023) a permis, grâce à des méthodes de télédétection, de créer des cartes d'occupations du sol sur plusieurs années. Pour compléter les résultats obtenus lors de cette étude et ses observations, il serait pertinent d'aller réaliser des relevés dendrochronologiques sur le terrain dans les zones présentant une tendance au dépôt et classifiées comme végétation ancienne ou très ancienne pour rendre compte des différences d'épaisseurs des sols. Il pourrait aussi être intéressant de creuser la piste de l'impact de l'homogénéité de la répartition de la végétation sur les taux d'érosion dans le bassin versant.

Enfin, tous ces facteurs n'agissent pas seuls. La construction de modèles linéaires généralisés a montré que c'est en prenant en compte la pente et l'âge que l'on peut expliquer au mieux la variabilité spatiale de l'érosion entre 2015 et 2021 dans ce bassin versant. Ces deux variables explicatives sont par ailleurs liées, comme observé avec d'autres études réalisées sur les marnes noires dans la région qui montraient déjà un lien prépondérant entre la pente et la végétation (Lakhdar, 2017 ; Ariagno, 2022a). Ce travail de stage a permis d'investiguer la variabilité spatiale des taux d'érosion sur un bassin versant, mais seulement entre deux dates. D'autres études se sont intéressées à la variabilité temporelle de ces taux d'érosion, et ont montré qu'elle dépendait à la fois des précipitations, et de certains processus de gélivation qui contrôlent la production de régo-lite les bassins versants marneux de l'observatoire de Draix (Rovéra & Robert, 2005 ; Ariagno, 2022b). Il serait alors pertinent de combiner les deux approches, d'une part la variabilité spatiale de l'érosion depuis ce modèle et d'une autre part, l'estimation de la valeur moyenne d'export sédimentaire à l'exutoire à partir du forçage climatique dans l'objectif d'obtenir un modèle encore plus fiable et précis.

4.3. Croissance des arbres et facteurs d'influence à l'échelle spatiale

La carte de la croissance des arbres entre 2015 et 2021 a été réalisée selon une méthode légèrement différente de la carte d'érosion (00). Comme pour la carte d'érosion, une des limites se trouve être dans la différence de densité entre les deux nuages. Une fois les classes de végétations isolées, le nuage de 2015 contient 60 millions de points contre 15 millions pour celui de 2021. Cette différence peut fragiliser la précision des informations contenues dans les pixels des modèles de hauteur.

De plus, la carte de la croissance de la végétation, confirme une dynamique de végétalisation du bassin versant et notamment des sols nus déjà observée par De Almeida (2023). La recherche de corrélation met en évidence qu'il n'y a pas d'influence de l'érosion ni d'autres facteurs de façon significative sur la répartition spatiale de la croissance des arbres dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021. On remarque que ce sont les feuillus qui ont le plus cru entre 2015 et 2021. Les résultats de De Almeida (2023) mettaient en évidence une forte évolution spatiale des résineux. Nous pouvons donc supposer que l'état des feuillus est stable, ceux-ci ne s'étendant plus spatialement mais croissent toujours, et plus que pour les résineux qui eut croissent doucement mais s'étendent spatialement. Cette supposition sur l'état sain des feuillus

est confirmée grâce à des cartes de greening qui indique une chronique de NDVI supérieure à 0,75 (De Almeida, 2023). Mais, dans les deux études une croissance de la végétation en zone classée comme sol nu est mise en évidence. Entre 2015 et 2021, De Almeida (2023) montre que le pourcentage de sol nu dans l'occupation du sol du bassin versant baisse de 55% à 53%. Comme cité précédemment, la recolonisation se fait d'abord par des jeunes conifères (cf. 4.2).

Enfin, la recherche de corrélation entre les facteurs de contrôle et la croissance montre qu'il n'y a pas d'effet de l'érosion sur la variation spatiale de la croissance de la végétation.

Conclusions et perspectives

Dans cette étude, nous cherchions à répondre à plusieurs questions. La première partie s'interrogeait sur la *répartition spatiale de l'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021 et l'influence des facteurs de contrôle identifiés sur ces taux d'érosion*. D'abord, la carte obtenue permet de visualiser spatialement les zones du bassin à forte dynamique érosive ou de dépôt. On remarque de nombreux petits glissements de terrains, avec pour niche de départ, des zones situées en forte pente. Ces petits glissements peuvent expliquer une part de l'érosion observée, mais le ruissellement est le mécanisme prépondérant. Aussi, le glissement de terrain survenu en 1999 est toujours légèrement actif et l'érosion sous celui-ci est toujours importante, due à la vidange du stock sédimentaire accumulé dans le chenal principal. Néanmoins, les résultats peuvent être discutés du fait que la date d'acquisition des deux nuages et la différence de densité entre ceux-ci peuvent influencer les valeurs obtenues.

Ensuite, les analyses ont montré que la pente et l'âge de la végétation sont les deux facteurs qui expliquent une part importante de la variance de l'érosion ($\eta^2 = 0,0948$, $\eta^2 = 0,301$). Les autres facteurs ne présentent pas de corrélation significative seuls. La corrélation entre la pente et l'érosion n'est pas très élevée. Cela peut être dû à la forte érosion du lit du court d'eau, situé en faible pente ou alors au fait qu'un modèle linéaire ne serait peut-être pas adapté pour cette variable. Ainsi, l'âge de la végétation est le facteur de contrôle qui influe le plus sur la variance de l'érosion. Cela peut être dû au développement des racines au fil du temps qui permettraient une agrégation du sol, mais aussi à la répartition spatiale du couvert végétal, le développement de la canopée, la diversification des espèces, etc. Il serait pertinent de creuser cette piste avec des méthodes de terrain telles que des relevés dendrochronologiques. L'utilisation d'un modèle linéaire généralisé a permis de confirmer que ces deux facteurs de contrôle sont ceux qui influent le plus sur la variabilité spatiale de l'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021. La validation a montré une erreur quadratique moyenne d'un centimètre. Le modèle peut donc être utilisé pour prédire la variabilité spatiale de l'érosion dans ce bassin. La création d'un modèle combinant la variabilité temporelle de ces taux d'érosion et la variabilité spatiale pourrait être une clé majeure dans la compréhension de l'érosion dans ce bassin et à plus large échelle dans les badlands marneux.

La seconde partie portait sur la *répartition spatiale de la croissance de la végétation et la recherche des facteurs de contrôle pouvant influencer cette répartition*. Pour répondre à ces questions, des modèles de hauteurs de croissance des arbres pour 2015 et 2021 ont été produits à partir des mêmes données LIDAR utilisées dans la partie précédente. La soustraction du modèle de 2015 au modèle de 2021 a permis la création d'une cartographie qui rend compte de la croissance de la végétation dans le bassin versant du Laval. Cette carte permet de comptabiliser une croissance moyenne de la végétation de 0,52 m en 6 ans, avec une croissance maximale des feuillus ainsi que de confirmer qu'il y a une dynamique de croissance de la végétation dans ce bassin versant (De Almeida, 2023). Néanmoins, tel que dans la partie précédente, la différence de densité entre les deux nuages est une source d'incertitude.

Enfin, des recherches de corrélations entre variables quantitatives puis qualitatives ont été effectuées selon les mêmes tests que pour la partie sur l'érosion. Pour les variables quantitatives, le test de Pearson a été utilisé. Cette investigation a permis de montrer qu'il n'y a pas de corrélation entre les facteurs quantitatifs. On observe donc une corrélation quasi nulle entre l'érosion et la croissance ($R^2 = -0,05$) ainsi qu'entre la croissance et les autres facteurs (Annexe

11). De la même façon, il n'y a pas de corrélation entre la croissance de la végétation et les facteurs de contrôle qualitatifs ; la taille d'effet de chaque facteur sur l'érosion étant très faible (Annexe 11).

Pour conclure, cette étude permet d'affirmer que deux facteurs influencent la répartition spatiale de l'érosion dans le bassin versant du Laval : la pente et la végétation. La végétation et notamment l'âge de celle-ci est le facteur majeur qui influence la répartition spatiale de ces taux d'érosions. Le modèle créé permet donc de prédire la variabilité spatiale de l'érosion dans le bassin versant du Laval. Mais à l'inverse, ni l'érosion, ni les autres facteurs de contrôles testés n'influencent la répartition spatiale de la croissance de la végétation.

Bibliographie

- Anagnostopoulou, Chr., Tolika, K., Flocas, H., & Maheras, P. (2006). Cyclones in the Mediterranean region: Present and future climate scenarios derived from a general circulation model (HadAM3P). *Advances in Geosciences*, 7, 9-14. <https://doi.org/10.5194/adgeo-7-9-2006>
- Antoine, P., Giraud, A., Meunier, M., & Asch, T. V. (1995). Geological and geotechnical properties of the “Terres Noires” in southeastern France: Weathering, erosion, solid transport and instability. *Engineering Geology*, 40(3), 223-234. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00053-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00053-4)
- Antoni, V., Darboux, F. (2009) L'érosion des sols. De la terre à la table.
- Ariagno, C. (2022a). *Suivi et modélisation de l'altération physique des marnes de Draix et de son impact sur l'érosion* [These de doctorat, Université Grenoble Alpes]. <https://theses.fr/2022GRALU031>
- Ariagno, C., Bouteiller, C. L., Beek, P. van D., & Klotz, S. (2022b). Sediment export in marly badland catchments modulated by frost-cracking intensity, Draix–Bléone Critical Zone Observatory, SE France. *Earth Surface Dynamics*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.5194/esurf-10-81-2022>
- Bechet, J., Duc, J., Loye, A., Jaboyedoff, M., Mathys, N., Malet, J.-P., Klotz, S., Le Bouteiller, C., Rudaz, B., & Travelletti, J. (2016). Detection of seasonal cycles of erosion processes in a black marl gully from a time series of high-resolution digital elevation models (DEMs). *Earth Surface Dynamics*, 4(4), 781-798. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-781-2016>
- Besl, P., & McKay, H. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 14, 239-256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Bonod, N. (2019). Les techniques LiDAR. *Photoniques, numéro 97*, pp. 22-29. <https://www.photoniques.com/articles/photon/abs/2019/04/contents/contents.html>
- Brantley, S. L., Eissenstat, D. M., Marshall, J. A., Godsey, S. E., Balogh-Brunstad, Z., Karwan, D. L., Papuga, S. A., Roering, J., Dawson, T. E., Evaristo, J., Chadwick, O., McDonnell, J. J., & Weathers, K. C. (2017). Reviews and syntheses: On the roles trees play in building \hack\newline and plumbing the critical zone. *Biogeosciences*, 14(22), 5115-5142. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5115-2017>
- Brochot, S. (1999). *Les bassins versants de Draix, expérimentaux... Et représentatifs*. 223. <https://hal.inrae.fr/hal-02577976>
- Bryan, R., & Yair, A. (1982). *Badland Geomorphology and Piping*. Geo Books.
- Burylo, M., Hudek, C., Rey, F. (2010) Soil reinforcement by the root system of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *CATENA*, 84 (1-2), 42p.
- Carrière, A. (2019). Impact de la végétation sur l'érosion des bassins versants marneux. Géologie appliquée. Université Grenoble Alpes. Français.
- Clarke, M. L., & Rendell, H. M. (2010). Climate-driven decrease in erosion in extant Mediterranean badlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(11), Article 11. <https://doi.org/10.1002/esp.1967>

- Copard, Y., Eyrolle, F., Radakovitch, O., Poirel, A., Raimbault, P., Gairoard, S., & Di-Giovanni, C. (2018). Badlands as a hot spot of petrogenic contribution to riverine particulate organic carbon to the Gulf of Lion (NW Mediterranean Sea). *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(12), 2495-2509. <https://doi.org/10.1002/esp.4409>
- Corona, C., Lopez Saez, J., Rovéra, G., Stoffel, M., Astrade, L., & Berger, F. (2011). High resolution, quantitative reconstruction of erosion rates based on anatomical changes in exposed roots at Draix, Alpes de Haute-Provence—Critical review of existing approaches and independent quality control of results. *Geomorphology*, 125(3), 433-444. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.030>
- Crawley, M. J. (2013). *The R book* (Second edition), Willey, 1060 p.
- Demangeot, J. (1984) Les milieux « naturels » du globe. Paris, Masson (Coll. « Géographie »), 250 p.
- De Ameida, T. (2023). *Dynamique de végétation dans les bassins de Draix depuis les 40 dernières années* [Mémoire non publié]. Université Paris-Est Créteil.
- Delannoy, J.J., Rovera, G. (1996). Conclusion : L'érosion dans les Alpes occidentales : contribution à un bilan des mesures et des méthodes / *Erosion in the western Alps : a contribution to an assesment of measurements and methods*. In: *Revue de géographie alpine*, tome 84, n°2, pp. 87-101.
- Descroix, L., Gautier, E., & Olivry, J.-C. (2002). L'influence de la végétation et de son évolution dans les processus d'érosion dans les Alpes du Sud. *Bulletin - Réseau Erosion*. <https://ird.hal.science/ird-02157719>
- Douadi, L., Aldon, M.-J., & Crosnier, A. (2005). *Variantes de l'Algorithme ICP pour le Recalage de Données 3D Couleur*.
- Egels Y., Kasser M., Meunier M., Muxart T., Guet C. (1989). Utilisation de méthodes topographiques (photogrammétrie terrestre et télémétrie sans réflecteur) pour la mesure de l'érosion de petits bassins versants expérimentaux et comparaison avec les mesures de transport solide à l'émissaire. Colloque transport solide, *La Houille Blanche*, 3/4, 183-187.
- Ellis, P. D. (2010). *The Essential Guide to Effect Sizes: Statistical Power, Meta-Analysis, and the Interpretation of Research Results* (1^{re} éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511761676>
- Erktan, A., Cécillon, L., Graf, F. *et al.* Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant Soil* **398**, 121–137 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2647-6>
- Fox, D., Carrega, D., Morschel, J., Emsellem, K. (2008). La dégradation des sols. La dégradation des sols dans le monde. <https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/degsoil/principes-fond.php>
- Gaillardet, J., Braud, I., Gandois, L., Probst, A., Probst, J.L., Sanchez-Pérez, J.M. & Simeoni-Sauvage, S. (2018). OZCAR: The French Network of Critical Zone Observatories. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-24.
- Gallart, F., Solé-Benet, A., Puigdefabragas, J., & Lazaro, R. (2002). *Badland Systems in the Mediterranean* (p. 299-326)
- IGN. (2023). *LiDAR HD Version 1.0—Descriptif de contenu des nuages de points LiDAR*.

- Ionesco, T., 1964, Considérations générales concernant les relations entre l'érosion et la végétation du Maroc, *Rev. Géogr. Maroc*, 6, pp.17-28.
- IRSTEA & Sintégra. (2015). *Bassins versants de Laval, Moulins et Brusquet—Levé Lidar : Rapport technique*.
- Klotz, S., Le Bouteiller, C., Mathys, N., Fontaine, F., Ravanat, X., Olivier, J.-E., Liébault, F., Jantzi, H., Coulmeau, P., Richard, D., Cambon, J.-P., & Meunier, M. (2023). A high-frequency, long-term data set of hydrology and sediment yield: The alpine badland catchments of Draix-Bléone Observatory. *Earth System Science Data*, 15(10), 4371-4388. <https://doi.org/10.5194/essd-15-4371-2023>
- Kuss, D., Theule, J., & Liébault, F. (2017). *METHODOLOGIE DE COMPARAISON DE DONNEES TOPGRAPHIQUES A HAUTE RESOLUTION : Synthèse bibliographique et exemples d'application*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36100.73600>
- Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Lakhdar, G. (2017). *Hydric erosion quantification on the marly soils of the Southern French Alps (la Motte du Caire region)*. *Romanian Journal of Geography*. 61, 27-38.
- Le Bouteiller, C., Chambon, G., Naaim-Bouvet, F., Mathys, N. (2021). Hydraulics and rheology of natural hyperconcentrated flows from Draix-Bleone observatory, French Alps. *Journal of Hydraulic Research*, 59(2), 181–195.
- Levy, C. (2011). Etude instrumentale et numérique de la réponse dynamique d'une écaille calcaire potentiellement instable. Sciences de la Terre. Université de Grenoble. Français.
- Maquaire, O., Ritzenthaler, A., Fabre, D., Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., Malet, J.-P., & Monnet, J. (2002). Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : Application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Comptes Rendus. Géoscience*, 334(11), 835-841. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(02\)01788-1](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(02)01788-1)
- Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M., & Richard, D. (2003). Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France). Calibration of the ETC rainfall–runoff–erosion model. *CATENA*, 50(2), Article 2. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00122-4)
- Mathys, N. (2006). *Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides : Cas des petits bassins versants de montagne sur marne (Draix, Alpes-de-Haute-Provence)* [These de doctorat, Grenoble INPG]. <https://theses.fr/2006INPG0151>
- Nadal-Romero, E., Martínez-Murillo, J.F., Kuhn, N.J. 2018. *Badlands Dynamics in a Context of Global Change* (p. 1-25). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813054-4.00001-0>
- Raclot, N., Puech, C., Mathys, N., Roux, B., Jacome, A., Asseline, J., Bailly, J-S. (2005). « Photographies aériennes prises par drone et Modèle Numérique de Terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 11 - n° 1 | 2005, mis en ligne le 01 juillet 2007, consulté le 10 juin 2024. URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/209>

- REY F., ROBERT Y., VENTO O., 2002, "Influence de la végétation forestière sur la formation de dépôts sédimentaires en terrains marneux", *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, Vol.8, N°1, 85-92.
- Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A., & Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience*, 336(11), Article 11. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.03.012>
- Rovéra, G., & Robert, Y. (2005). Conditions climatiques hivernales et processus d'érosion périglaciaires dans les badlands marneux de Draix (800 m, Alpes du Sud, France). *Géographie physique et Quaternaire*, 59(1), Article 1. <https://doi.org/10.7202/013735ar>
- Valadas, B. (2005). *Géomorphologie dynamique*. Armand Colin. <https://books.google.fr/books?id=kAk1HAAACAAJ>
- Si, H., Qiu, J., & Li, Y. (2022). A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Laser Scanners: Applications in Large-Scale Aircraft Measurement. *Applied Sciences*, 12(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/app122010247>
- Tacon, S., Liébault, F., Piégay, H. (2011). Etude des changements morphologiques d'une rivière en tresses par LiDAR aéroporté. In: *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, numéro 12. Images et modèles 3D en milieux naturels. pp. 171-176.
- Vallauri, D. (1997). *Dynamique de la restauration forestière des substrats marneux avec Pinus nigra J. F Arnold ssp. Nigra dans le secteur haut-provençal : Trajectoires dynamiques, avancement du processus de restauration et diagnostic sur l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes recrées* [These de doctorat, Aix-Marseille 3]. <https://theses.fr/1997AIX30111>
- Yang, J., Li, H., Campbell, D., & Jia, Y. (2016). Go-ICP: A Globally Optimal Solution to 3D ICP Point-Set Registration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(11), Article 11. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2513405>

Liste des figures

Figure 1 : Bassin versant du Laval, Alpes-de-Haute-Provence, avril 2024. ©Caroline Le Bouteiller.....	11
Figure 2 : Interactions végétation-érosion-climat. Source : Le Bouteiller, 2024.....	13
Figure 3 : Localisation du bassin versant du Laval.....	17
Figure 4 : Carte géomorphologique du bassin versant du Laval, Alpes-de-Haute-Provence ..	19
Figure 5 : Transition du couvert végétal entre 1982 et 2021 dans le bassin versant du Laval (source : De Almeida, 2023)	21
Figure 6 : Instrumentation des sites de mesures. Source : Mathys, 1999	22
Figure 7 : Méthodologie de comparaison de nuage LiDAR pour la production d'une carte d'érosion spatialisée dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021	24
Figure 8 : Représentation des nuages de points de 2015 (gauche) et 2021 (droite) sous Cloud Compare ©J.Pellerano.....	26
Figure 9 : Principe de l'algorithme ICP (Si et al., 2022).	26
Figure 10 : Localisation des zones stables	27
Figure 11 : Nuage résultat des distances entre 2015 et 2021 à partir des données LiDAR dans le bassin versant du Laval.	28
Figure 12 : Méthodologie pour la recherche des facteurs de contrôle qui peuvent influencer les valeurs d'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021	29
Figure 13 : Schéma méthodologique de validation des modèles linéaires généralisés pour l'identification des facteurs qui influent sur les dynamiques d'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021	33
Figure 14 : Schéma méthodologique de la création d'un raster de croissance de la végétation entre 2015 et 2021 dans le bassin versant du Laval à partir de données LiDAR.....	33
Figure 15 : Boxplot de la distance moyenne calculée pour les zones stables. ©J.Pellerano ...	35
Figure 16 : Cartographie des évolutions topographiques dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021.....	36
Figure 17 : Moyenne d'érosion selon les classes de pente entre 2015 et 2021 dans le bassin versant du Laval	37
Figure 18 : Moyenne d'érosion/dépôt selon la dynamique de la végétation entre 1982 et 2021 dans le bassin versant du Laval	38
Figure 19 : Matrice de corrélation entre les variables quantitatives topographiques dans le bassin versant du Laval	39
Figure 20 : Répartition de l'âge de la végétation selon la pente dans le bassin versant du Laval	40
Figure 21 : Observation vs prédiction des valeurs de l'érosion selon l'âge de la végétation dans le bassin versant du Laval	41
Figure 22 : Cartographie de la croissance de la végétation dans le bassin versant du Laval, à partir de données LiDAR entre 2015 et 2021.	42
Figure 23 : Diagrammes de densité de distribution des hauteurs en fonction du type d'occupation du sol. A gauche : 2015 / A droite : 2021	43
Figure 24 : Boxplot de la croissance moyenne de la végétation selon l'âge de la végétation dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021	43

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différentes études réalisées dans les bassins versants de l'ORE Draix-Bléone pour la quantification de l'érosion	23
Tableau 2 : Facteurs de contrôle et leurs modalités choisis pour tester leur rôle sur la variabilité de l'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021	30
Tableau 3 : Différents types de glm. Source : DellaData.com	32

Liste des annexes

Annexe 1 : Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin versant du Laval en 2015. Modifiée de De Almeida, 2023.	60
Annexe 2 : Cumuls annuels des volumes érodés dans le bassin versant du Laval. Source : Données observatoire Draix-Bléone.	61
Annexe 3 : Recalage des valeurs d'érosion selon les données à l'exutoire	62
Annexe 4 : Informations relatives au traitement des données sous R	63
Annexe 5 : Histogramme des distances calculées à partir d'un raster (50x50 cm) issu d'un nuage de point LiDAR dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021.....	64
Annexe 6 : Erosion moyenne selon les modalités des facteurs topographiques	65
Annexe 7 : Statistiques zonales de l'érosion moyenne selon les facteurs écologiques.....	67
Annexe 8 : Tests de corrélation de Kruskal et Wallis	68
Annexe 9 : Modèles linéaires généralisés	69
Annexe 10 : Croissance moyenne selon les modalités de chaque facteur	70
Annexe 11 : Recherche de corrélation entre croissance de la végétation et les autres facteurs	71

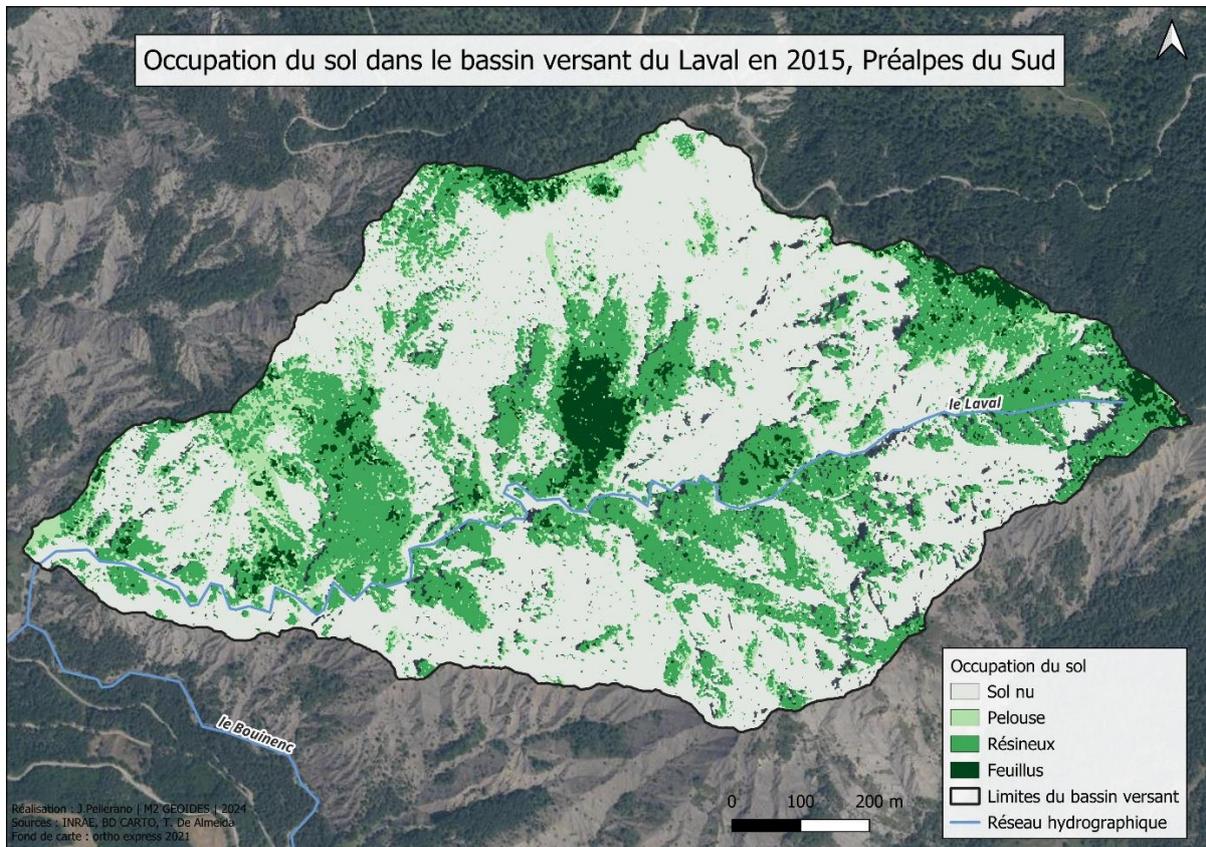
Table des matières

ABSTRACT	2
REMERCIEMENTS	4
SIGLES ET ACRONYMES	5
SOMMAIRE	6
INTRODUCTION	7
1. CONTEXTE	9
1.1. ETAT DE L'ART	9
1.1.1. <i>L'érosion des lithologies marneuses</i>	9
1.1.1.1. Généralités	9
1.1.1.2. Altération et détachement	9
1.1.1.3. Transport et dépôt	10
1.1.1.4. La morphogenèse des <i>badlands</i>	11
1.1.2. <i>Facteurs abiotiques qui influencent la variation des taux d'érosion.</i>	12
1.1.2.1. Lithologie et sols	13
1.1.2.2. La topographie	13
1.1.2.3. Le climat	14
1.1.3. <i>Facteurs biotiques qui influencent la variation des taux d'érosion.</i>	14
1.1.4. <i>L'avenir des badlands face au changement climatique</i>	15
1.1.5. <i>La quantification de l'érosion par LiDAR</i>	16
1.2. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE : LE BASSIN VERSANT DU LAVAL	17
1.2.1. <i>Présentation globale.</i>	17
1.2.2. <i>Topographie et géologie.</i>	18
1.2.3. <i>Conditions climatiques</i>	19
1.2.4. <i>Couverture végétale</i>	19
1.2.5. <i>Quantification de l'érosion dans l'observatoire de Draix-Bléone</i>	21
2. METHODOLOGIE	24
2.1. PRODUCTION DE LA CARTE DE COMPARAISON DES NUAGES	24
2.1.1. <i>Pré-traitements</i>	25
Nuage de 2015	25
Nuage de 2021	25
2.1.2. <i>Alignement des nuages</i>	26
2.1.3. <i>Validation du bon alignement des nuages.</i>	27
2.1.4. <i>Maillage et comparaison</i>	27
2.1.5. <i>Rastérisation et découpage selon l'emprise du Laval</i>	28
2.2. RECHERCHE DES FACTEURS DE CONTROLE DE L'EROSION	29
2.2.1. <i>Sélection, calcul et classement des facteurs</i>	29
2.2.2. <i>Statistiques réalisées</i>	30
2.2.2.1. Statistiques descriptives	30
2.2.2.2. Tests de corrélation	31
2.2.2.3. Test de Kruskal-Wallis	31
2.3. MODELES LINEAIRES GENERALISES	31
2.3.1. <i>Construction des modèles</i>	31
2.3.2. <i>Validation des modèles</i>	32
2.4. RECHERCHE D'UNE POTENTIELLE INFLUENCE DES FACTEURS SUR L'EVOLUTION DE LA VEGETATION	33
2.4.1. <i>Pré-traitements</i>	33
2.4.2. <i>Elaboration du raster de croissance.</i>	34
2.4.3. <i>Statistiques et recherche de corrélation entre la croissance et les facteurs.</i>	34
3. RESULTATS	35

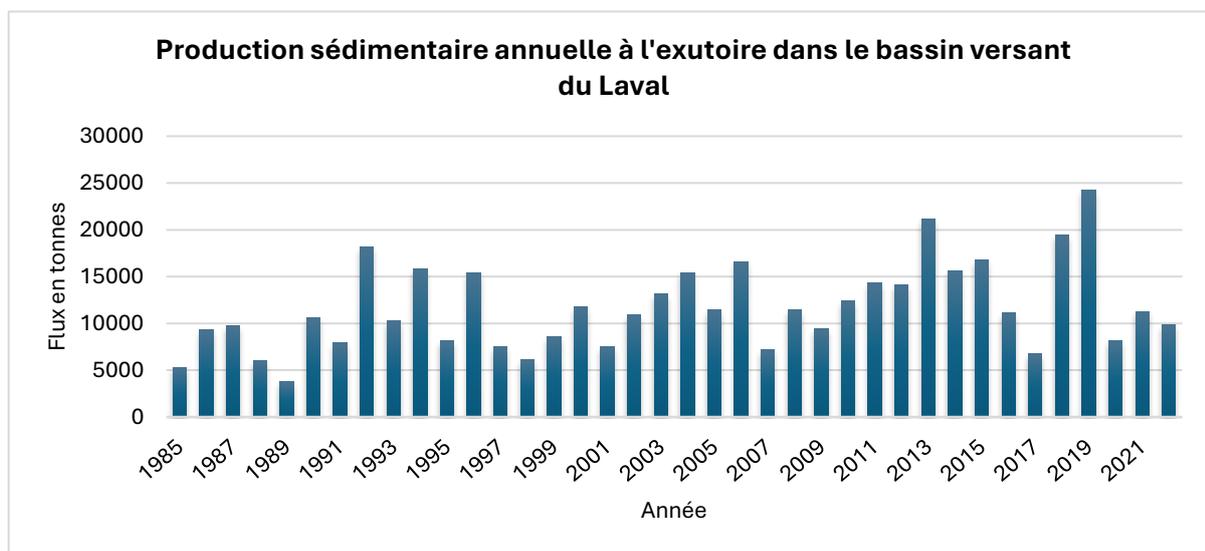
3.1.	LA CARTE DE L'ÉROSION SPATIALISÉE ENTRE 2015 ET 2021	35
3.2.	RECHERCHE DES FACTEURS D'INFLUENCE DE LA VARIATION DE L'ÉROSION	37
3.2.1.	<i>Résultat des statistiques descriptives</i>	37
3.2.1.1.	Facteurs abiotiques	37
3.2.1.2.	Facteurs biotiques	38
3.2.2.	<i>Résultats des tests de corrélation</i>	39
3.3.	CONSTRUCTION DE MODELES LINEAIRES GENERALISES POUR LA PREDICTION DE L'ÉROSION	39
3.4.	CARTOGRAPHIE DE LA CROISSANCE DE LA VEGETATION ENTRE 2015 ET 2021	41
3.5.	RECHERCHE DES FACTEURS D'INFLUENCE DE LA VARIATION DE LA CROISSANCE DE LA VEGETATION	42
4.	DISCUSSION	45
4.1.	LIMITES ET APPORTS DE LA METHODOLOGIE LIEE A L'UTILISATION DU LIDAR POUR L'ETUDE DES TAUX D'ÉROSION 45	
4.2.	LE ROLE DES FACTEURS DANS LA VARIATION DE L'ÉROSION A L'ÉCHELLE SPATIALE	46
4.3.	CROISSANCE DES ARBRES ET FACTEURS D'INFLUENCE A L'ÉCHELLE SPATIALE	47
	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	49
	BIBLIOGRAPHIE	51
	LISTE DES FIGURES	55
	LISTE DES TABLEAUX	56
	LISTE DES ANNEXES	57
	TABLE DES MATIERES	58
	ANNEXES	60

Annexes

Annexe 1 : Cartographie de l'occupation du sol dans le bassin versant du Laval en 2015. Modifiée de De Almeida, 2023.



Annexe 2 : Cumuls annuels des volumes érodés dans le bassin versant du Laval.
Source : Données observatoire Draix-Bléone.



Annexe 3 : Recalage des valeurs d'érosion selon les données à l'exutoire

- | |
|---|
| <p>(1) Différence = Moyenne érosion calculée – Taux exutoire
(2) Moyenne réelle = Moyenne érosion calculée + Différence</p> |
|---|

Annexe 4 : Informations relatives au traitement des données sous R

Annexe 4.1 : Tests de corrélation entre l'érosion et les variables quantitatives

```
cor.test(Data$Erosion, Data$Pente)
mcor <- cor(Data)
```

Annexe 4.2 : Test de corrélation entre la variable érosion et les variables qualitatives

```
Test.kruskal <- data %>%
  kruskal_test(Variable dépendante ~ Variable explicative)
Effet.size.kruskal <- Data %>%
  kruskal_effsize(Variable dépendante ~ Variable explicative)
```

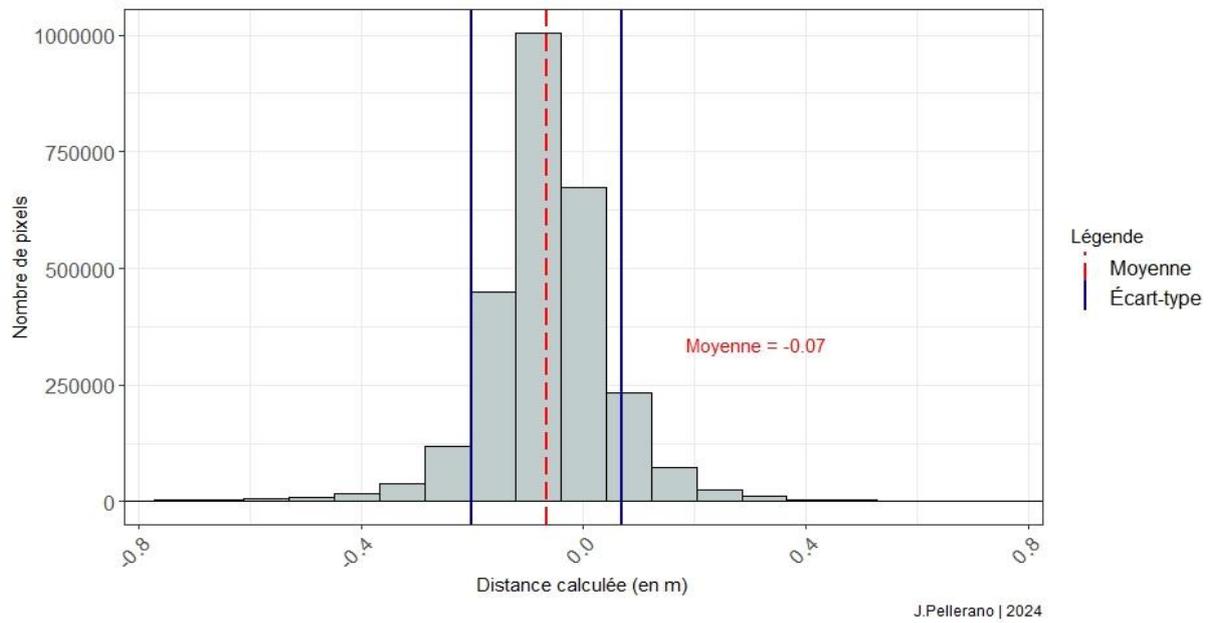
Annexe 4.3 : Effets de taille selon la convention de Cohen. Source : Cohen, 1988.

Test	Relevant effect size	Effect size classes		
		Small	Medium	Large
Comparison of independent means	$d, \Delta, \text{Hedges' } g$	.20	.50	.80
Comparison of two correlations	q	.10	.30	.50
Difference between proportions	Cohen's g	.05	.15	.25
Correlation	r	.10	.30	.50
	r^2	.01	.09	.25
Crosstabulation	w, φ, V, C	.10	.30	.50
ANOVA	f	.10	.25	.40
	η^2	.01	.06	.14
Multiple regression	R^2	.02	.13	.26
	f^2	.02	.15	.35

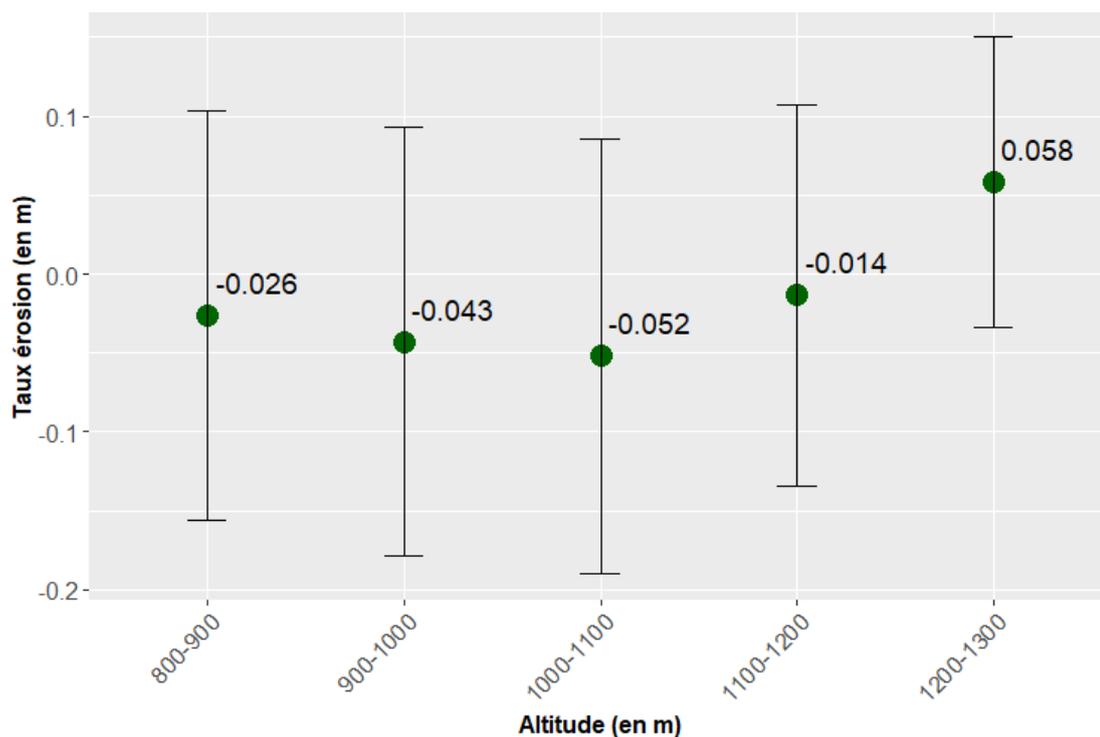
Annexe 4.4 : Modèle linéaire généralisé

```
glm(Variable réponse ~ Variable prédictive, data, family = gaussian(link = "identity"))
```

Annexe 5 : Histogramme des distances calculées à partir d'un raster (50x50 cm) issu d'un nuage de point LiDAR dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021.

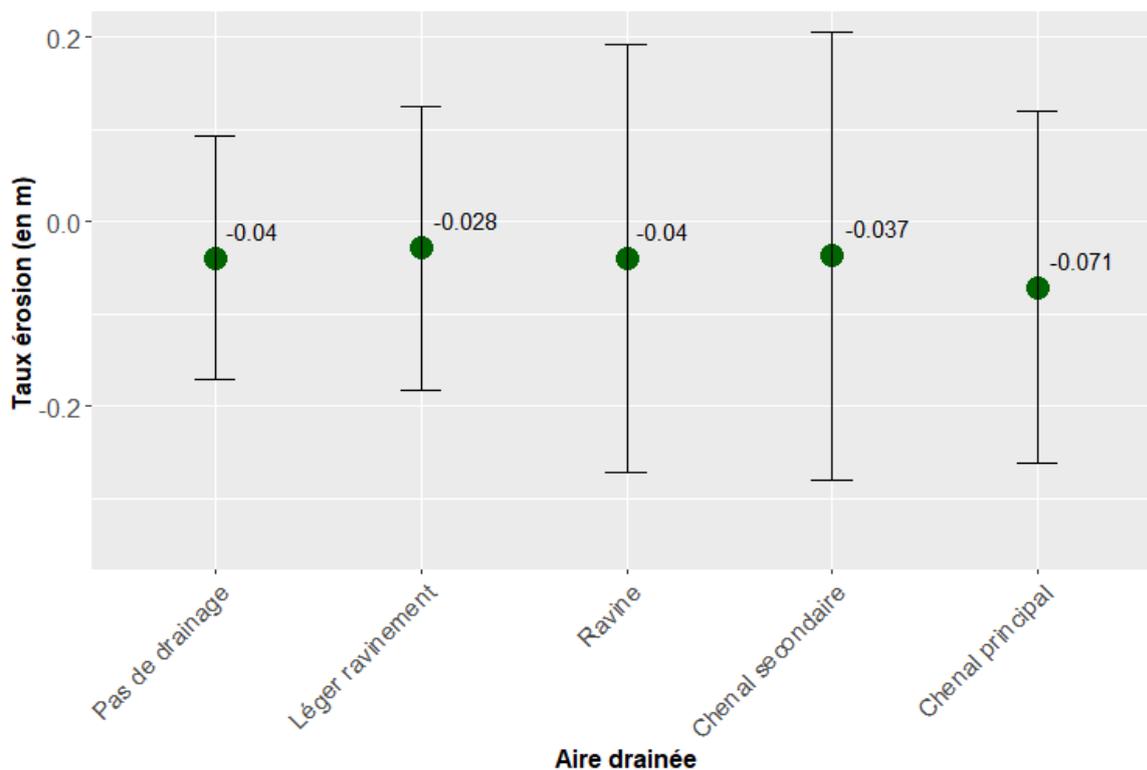


Annexe 6 : Erosion moyenne selon les modalités des facteurs topographiques



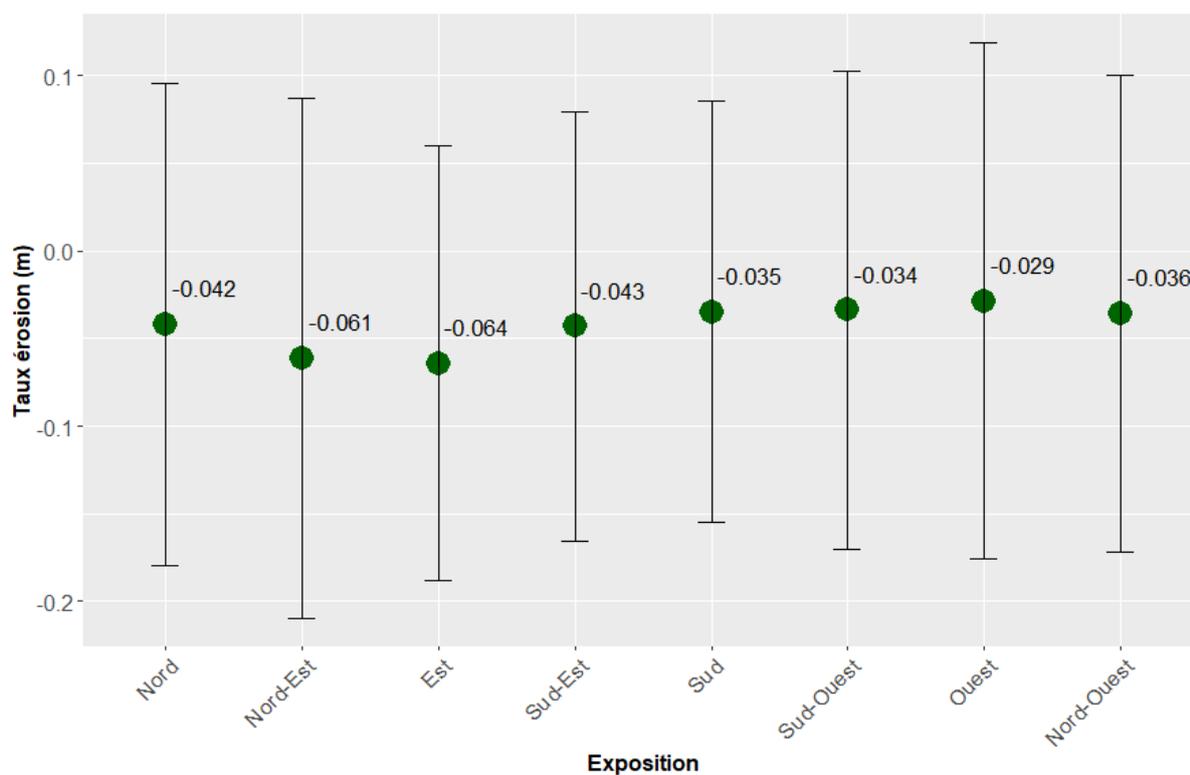
J.Pellerano | 2024

Figure 1 : Moyenne d'érosion/dépôt selon l'altitude dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021



J.Pellerano | 2024

Figure 2 : Moyenne d'érosion/dépôt selon l'aire drainée dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021



J.Pellerano | 2024

Figure 3 : Moyenne d'érosion/dépôt selon l'exposition dans le bassin du Laval entre 2015 et 2021

Annexe 7 : Statistiques zonales de l'érosion moyenne selon les facteurs écologiques

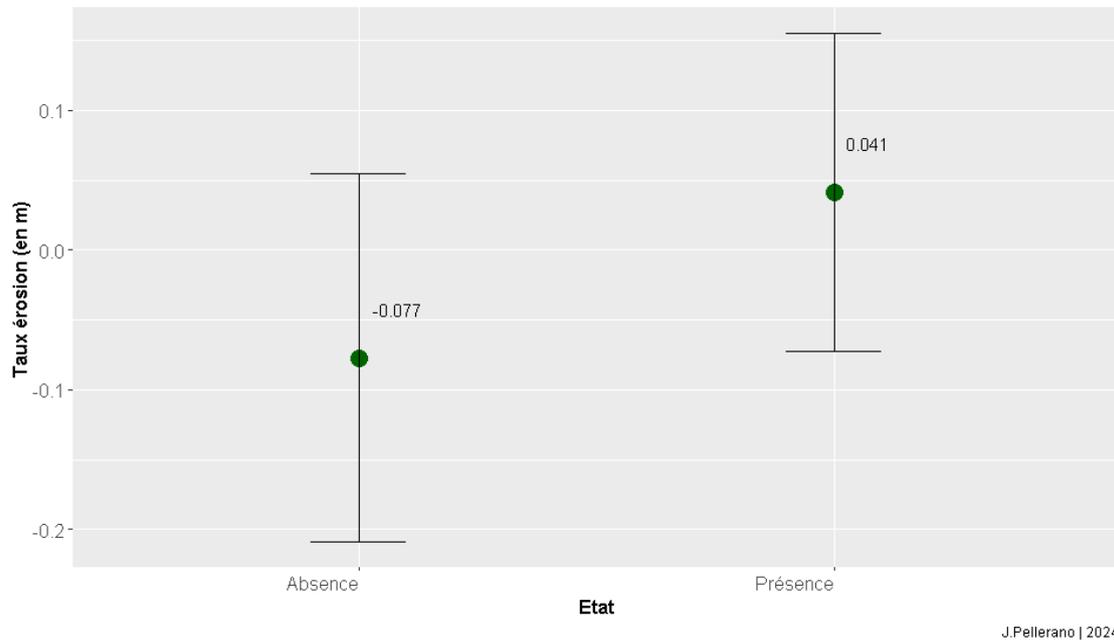


Figure 1 : Moyenne d'ablation/dépôt selon l'état du couvert végétal dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

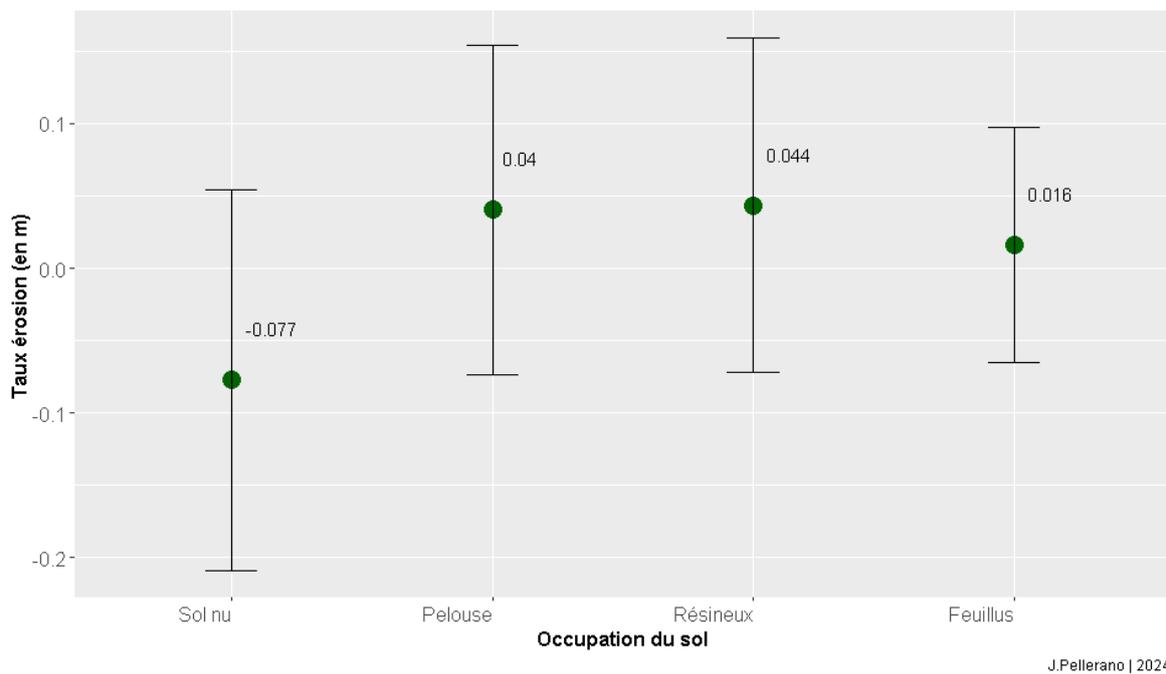


Figure 2 : Moyenne d'ablation/dépôt selon l'occupation du sol en 2015 dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

Annexe 8 : Tests de corrélation de Kruskal et Wallis

<i>Facteurs</i>	<i>Test</i>	<i>Taille effet</i>	<i>Interprétation</i>
Pente	0	0,0948	Modéré
Exposition	0	0,01	Petit
Aire drainée	6.47e-245	0,000474	Petit
Altitude	0	0,0215	Petit
Age	0	0,304	Large
Type	0	0,285	Large
Absence/Présence	0	0,284	Large

Figure 1 : Valeurs des tests non paramétrique de Kruskal et Wallis pour la recherche de corrélation entre l'érosion et les variables qualitatives dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

Annexe 9 : Modèles linéaires généralisés

<i>Facteurs</i>	<i>AIC</i>
Erosion~Pente	-2793236
Erosion~Alti	-2725983
Erosion~Expo	-2708860
Erosion~Aire	-2696684
Erosion~Age	-3135400
Erosion~Type	-3103504
Erosion~Absence/Présence	-3101856
Erosion ~ Age + Pente	-3147312

Figure 1 : Résultats des modèles glm entre l'érosion et les facteurs topographique pour la recherche des facteurs d'influence sur l'érosion dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

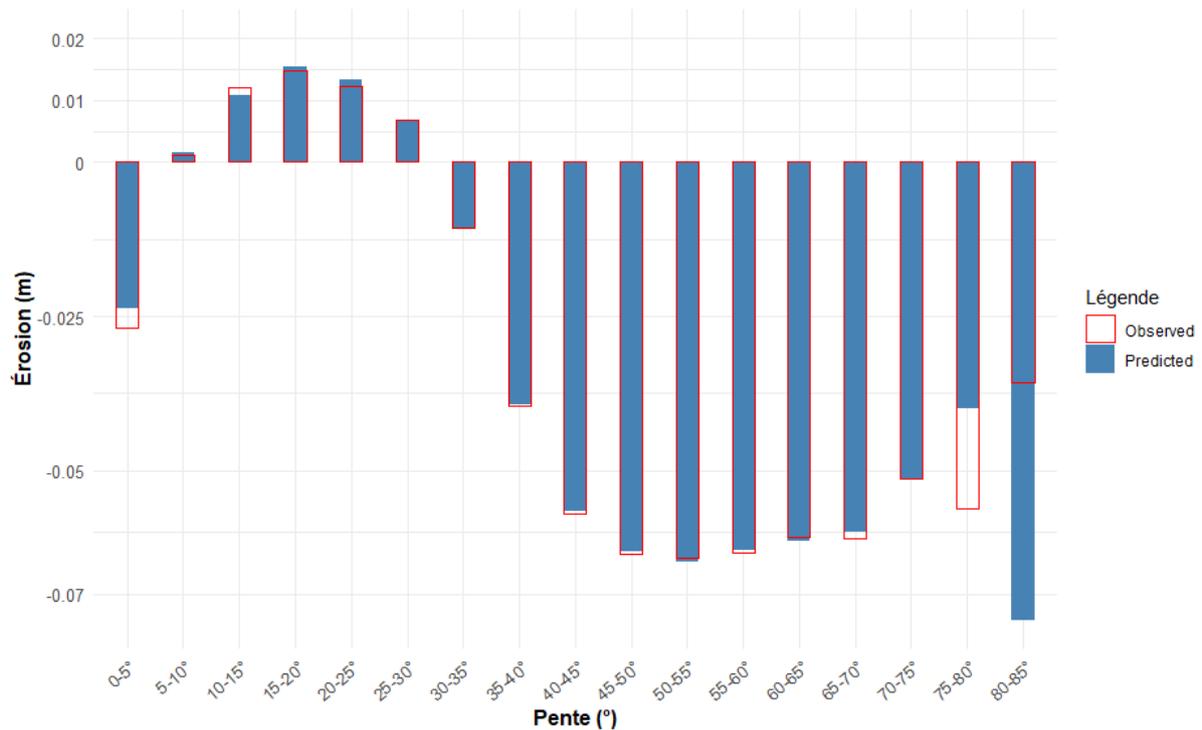


Figure 2 : Observation vs prédiction des valeurs de l'érosion selon les classes de pentes dans le bassin versant du Laval

Annexe 10 : Croissance moyenne selon les modalités de chaque facteur

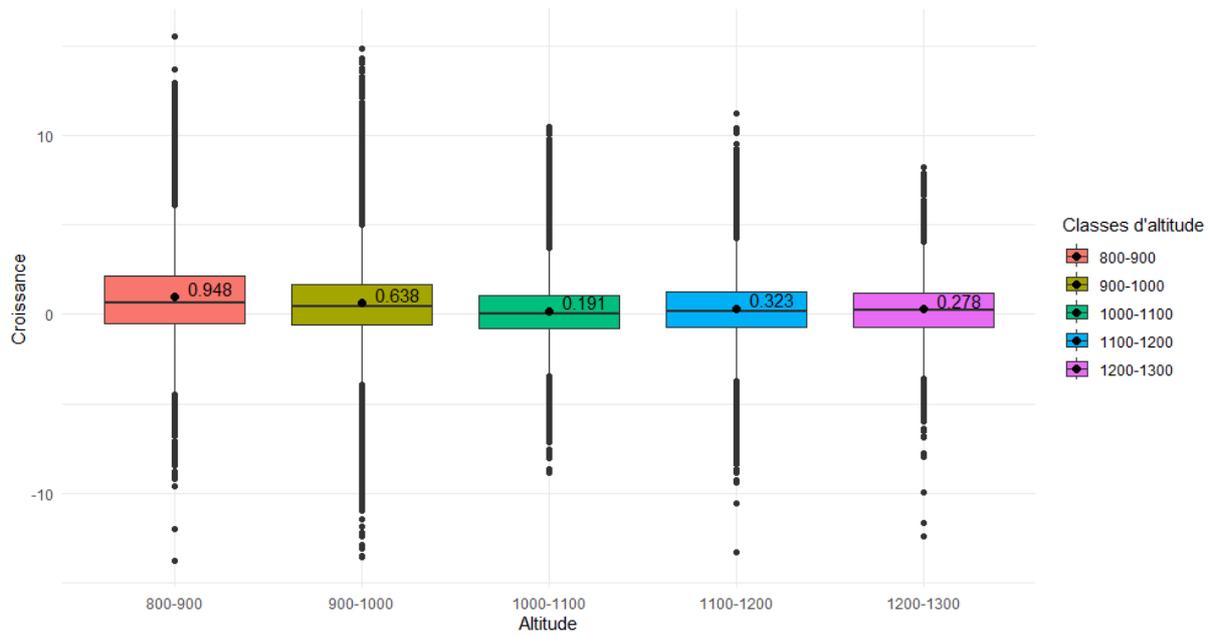


Figure 1 : Boxplot de la croissance moyenne de la végétation selon chaque classe d'altitude dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

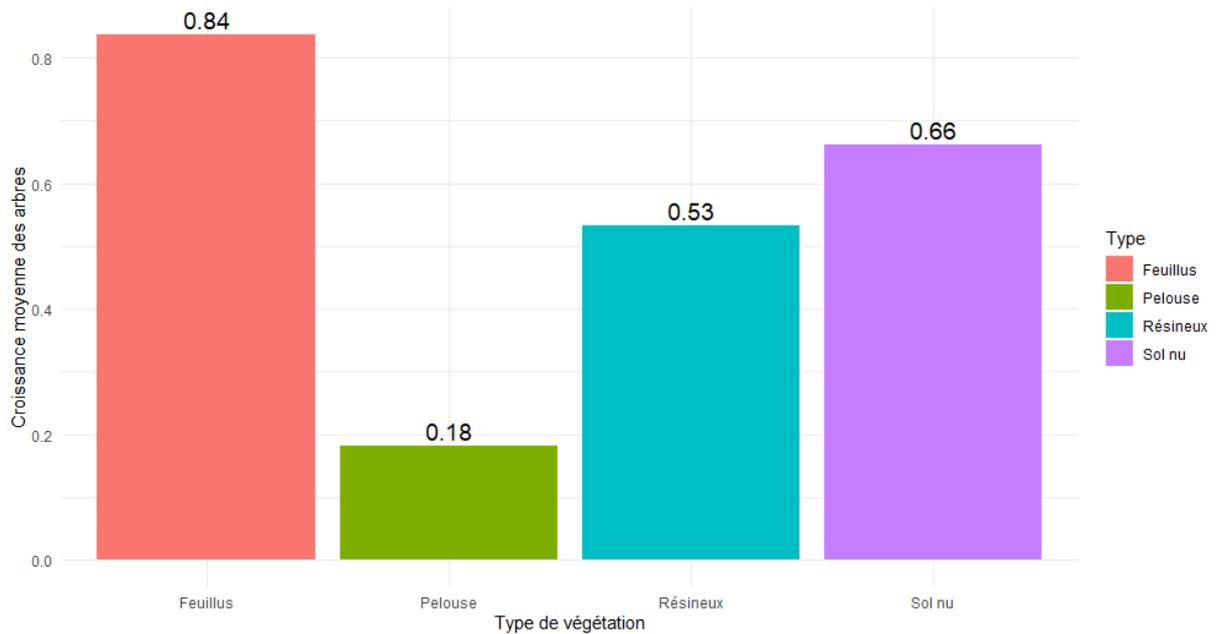


Figure 2 : Diagramme en barre de la croissance moyenne de la végétation selon le type d'occupation du sol dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

Annexe 11 : Recherche de corrélation entre croissance de la végétation et les autres facteurs

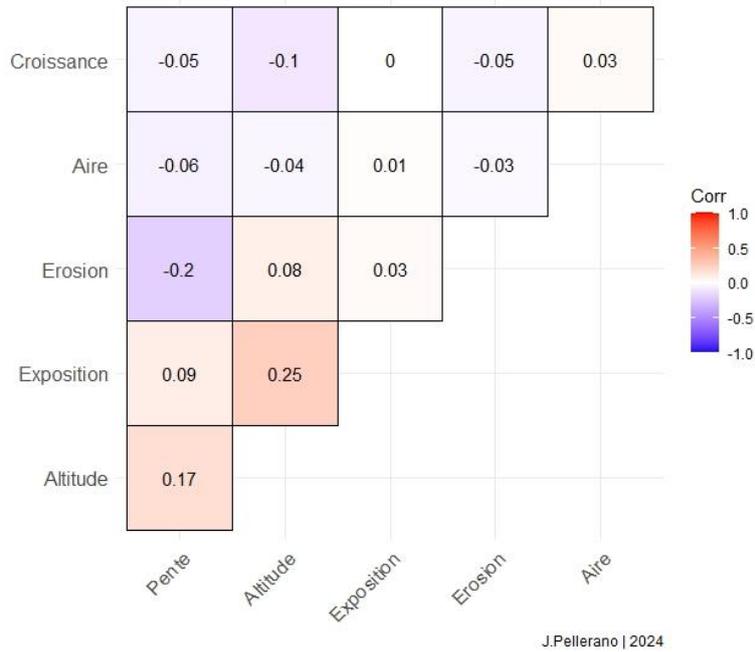


Figure 1 : Matrice de corrélation entre les différents facteurs quantitatifs pour la croissance des arbres dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021

Facteurs	Test	Taille effet	Interprétation
Pente	0	0.00389	Petit
Exposition	0	0.00956	Petit
Aire	0	0.000109	Petit
Altitude	0	0.0108	Petit
Erosion	0	6 5.72e-95	Petit
Age	0	0.00968	Petit
Type	0	0.00804	Petit

Figure 2 : Tableau récapitulatif du test non paramétrique de Krustal et Wallis entre la croissance des arbres et les facteurs qualitatifs dans le bassin versant du Laval entre 2015 et 2021