



HAL
open science

Utilisation d'un modèle spatialisé pour mesurer l'évolution de l'érosion des sols des plans d'eau français de 1850 à 2100

Valentine Sollier

► **To cite this version:**

Valentine Sollier. Utilisation d'un modèle spatialisé pour mesurer l'évolution de l'érosion des sols des plans d'eau français de 1850 à 2100. Géographie. 2023. dumas-04230587

HAL Id: dumas-04230587

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04230587>

Submitted on 6 Oct 2023

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.

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du Master Géographie, Aménagement, Environnement, Développement
Parcours Géomatique et Analyse Spatiale

Université Grenoble Alpes – Année Universitaire 2022-2023

Dans le cadre du stage réalisé à l'INRAE CARTEL – Le Bourget-du-Lac
En partenariat avec le CIH EDF et le laboratoire EDYTEM

UTILISATION D'UN MODÈLE SPATIALISÉ POUR MESURER L'ÉVOLUTION DE L'ÉROSION DES SOLS AUTOUR DES PLANS D'EAU FRANÇAIS DE 1850 À 2100

Valentine SOLLIER



Composition du jury lors de la soutenance du 07/09/2023

Tuteur universitaire : Sarah DUCHÉ (PACTE – CNRS-UGA)

Tuteur en laboratoire : Jean-Philippe JENNY (CARTEL – INRAE-USMB)
Georges-Marie SAULNIER (EDYTEM – CNRS-USMB)
Théo MAZURE (CARTEL – INRAE-USMB)
Vincent CHANUDET (CIH EDF)

Membre universitaire : Paule-Annick DAVOINE (LIG – CNRS-UGA)
Humbert FIORINO (LIG – CNRS-UGA)
Philippe GARAT (LJK – CNRS-UGA)

DROITS D'AUTEURS

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



RÉSUMÉ

Au cours de la dernière décennie, l'attention particulière portée sur la problématique de l'érosion des sols par les différentes sphères de la société, scientifique, associative ou politique s'explique par les conséquences multidimensionnelles des effets de l'érosion, affectant ainsi la production alimentaire, la qualité de l'eau, les services écosystémiques, la biodiversité et les stocks de carbone. Ainsi, l'accélération de l'érosion des sols au cours de l'Anthropocène liée aux activités humaines augmente de manière significative les exports de sédiments et de carbone vers les milieux aquatiques, ayant ainsi des conséquences sur l'état physico-chimique, biologique et sur la qualité des plans d'eau : lacs et réservoirs. Ce contexte témoigne de la nécessité de mieux comprendre l'évolution des flux d'érosion passés et futurs pour une meilleure compréhension générale de l'érosion et des facteurs de contrôle impliqués.

Pour répondre à ce besoin, des modèles mathématiques sont développés dans l'idée de mieux quantifier l'érosion autour des plans d'eau. Cependant ces approches sont encore peu utilisées sur des périodes longues de l'ordre de plusieurs décennies à des centaines d'années, limitant par conséquent la prise de recul pour repositionner les changements en cours et appréhender le devenir des flux via les scénarios futurs. Ainsi, dans ce projet nous proposons d'utiliser un modèle existant d'érosion, RUSLE, dans l'idée de pouvoir estimer les flux présents, passés et futurs d'érosion vers les plans d'eau, ce qui représente un réel enjeu pour les gestionnaires de la ressource en eau. Le modèle sera dans un premier temps testé sur un ensemble de retenues issues du réseau de barrages EDF, avant d'être appliqué ensuite sur les plans d'eau en France. La mise en place d'un forçage temporel sur un facteur du modèle RUSLE, permettra d'obtenir les chroniques temporelles d'érosion, sur l'ensemble de la période d'étude (1850-2100), qui seront comparées entre lacs naturels et artificiels (réservoirs).

Mots clés : érosion ; RUSLE ; occupation des sols ; plans d'eau ; lacs ; réservoirs ; bassins versants, France, scénarios futurs

ABSTRACT

Over the past decade, soil erosion has been the focus of particular attention in various spheres of society, whether scientific, associative or political, due to the multi-dimensional consequences of the effects of erosion, affecting food production, water quality, ecosystem services, biodiversity and carbon stocks. Thus, at the dawn of the Anthropocene, the acceleration of soil erosion linked to human activities is significantly increasing the export of sediment and carbon to aquatic environments, with consequences for the physico-chemical and biological status and quality of water bodies: lakes and reservoirs. This context highlights the need for a better understanding of the evolution of past and future erosion flows for a better overall understanding of erosion and the controlling factors involved.

To meet this need, mathematical models have been developed to better quantify erosion around water bodies. However, these approaches are not yet widely used over long periods ranging from several decades to hundreds of years, thus limiting the ability to take a step back to reposition ongoing changes and understand the future of flows via future scenarios. In this project, we propose to use an existing erosion model, RUSLE, to estimate present, past and future erosion flows towards water bodies which represents a real challenge for water resource managers. The model will first be tested on a set of reservoirs from the EDF dam network, before being applied to water bodies in France. Temporal forcing on one factor of the RUSLE model will provide erosion time series over the entire study period (1850-2100), which will be compared between natural and artificial lakes (reservoirs).

Keywords : erosion ; RUSLE ; land use ; water bodies ; lakes ; reservoirs ; watersheds ; France, future scenarios

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adressent à Luc Navet et Charline Giguet-Covex pour l'appui et la recommandation de ma candidature. Je tiens également à remercier Jean-Philippe Jenny et Georges-Marie Saulnier pour m'avoir fait confiance et pour leur suivi, tout au long de ce stage. Un grand merci à Laura Melo-Vieira-Soares et Olivia Desgué-Itier pour leur accueil dans leur bureau et leur bonne humeur quotidienne. J'adresse un remerciement particulier au doctorant Théo Mazure pour son aide et sa grande implication dans l'aboutissement de mon stage. Je ne t'oublie pas Margot et notre moment mémorable au laboratoire pour le broyage de sédiments du lac d'Annecy.

Je tiens à remercier l'ensemble des acteurs des différentes structures : au sein du laboratoire de l'INRAE CARTELE, le CIH EDF et du CNRS EDYTEM et tiens à souligner l'importance de cette collaboration sans laquelle ce projet de recherche n'aurait pas pu être réalisé.

J'exprime ma reconnaissance envers Madame Sarah Duché, pour son suivi en tant que tutrice pédagogique durant ce stage, sa présence et ses conseils durant ma deuxième année de Master. Je remercie également mes professeurs et particulièrement Madame Paule-Annick Davoine et Monsieur Humbert Fiorino pour leur implication durant mes années universitaires en tant que responsables du master.

Parce que l'obtention du Master marque la fin d'un chapitre : Pour mes camarades de promotion et amis, Samantha, Fabien et Aymeric, un grand merci pour tous ces moments passés ensemble, sans vous ce Master n'aurait pas été aussi amusant.

A Salomé, mon acolyte depuis le début des études supérieures, parce que nous avons grandi ensemble en classe préparatoire, pour nos fous rires que nous seules comprenons mais aussi pour nos multiples et constructives réflexions qui m'ont fait évoluer, merci à toi.

*Pour ma famille, mes parents et ma sœur, merci pour leurs conseils, leurs encouragements, et leur intérêt tant dans mon master que dans cette expérience professionnelle.
Merci à ma grand-mère, Élisabeth, qui a suivi mes aventures grenobloises et bourgetaines.*

*Une personne mérite un remerciement particulier : celui qui a toujours cru en moi et soutenu sans faillir, qui a eu la patience de m'écouter et qui a su trouver les mots pour me rassurer :
Merci à toi, Eloi.*

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	7
ABSTRACT.....	8
REMERCIEMENTS.....	9
Liste alphabétique des acronymes.....	13
Liste des figures.....	14
INTRODUCTION	16
CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	21
1. LES PLANS D'EAU EN FRANCE	21
1.1. Distinction entre plans d'eau naturels et artificiels.....	21
1.2. Les bassins versants associés aux plans d'eau	24
2. L'OCCUPATION DES SOLS : LE COUVERT FORESTIER	27
2.1. Focalisation sur la forêt : une variable importante pour le contrôle de l'érosion	27
2.2. Analyse spatiale et temporelle du couvert forestier en France	28
ÉTAT DE L'ART	33
1. MODÉLISER L'ÉROSION : LE MODÈLE RUSLE	33
2. RECONSTITUER L'OCCUPATION DES SOLS.....	35
MÉTHODOLOGIE.....	37
1. DESCRIPTION GÉNÉRALE	37
2. UTILISATION DU MODÈLE RUSLE CONTRAINT AVEC LES DONNÉES D'OCCUPATION DES SOLS	40
2.1. Choix de la base de données LUH2	40
2.2 Représenter l'érosion des sols autour des plans d'eau français	42
RÉSULTATS	44
1. VALIDATION DE LA MÉTHODE D'ESTIMATION DE L'ÉROSION.....	44
2. CHRONIQUES TEMPORELLES D'ÉROSION DES SOLS AUTOUR DES LACS NATURELS ET DES RÉSERVOIRS	45
DISCUSSION GÉNÉRALE	49
1. DISCUSSION SUR L'APPROCHE DE L'ÉTUDE.....	49
2. DISCUSSION SUR LES RESULTATS	50
CONCLUSION.....	52
BIBLIOGRAPHIE.....	53

LISTE ALPHABÉTIQUE DES ACRONYMES

CARTEL	Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Écosystèmes Limniques
CE	Common Era
CIH - EDF	Centre d'Ingénierie Hydraulique – Électricité de France
EDYTEM	Laboratoire Environnement, Dynamique, et Territoire de Montagne
GASEMT	Global Applications of Soil Erosion Modelling Tracker
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Missions Starfish 2030

Figure 2 : L'érosion dans le bassin versant

Figure 3 : Plan d'eau issus de HydroLAKES selon la base de données HydroSHEDS

Figure 4 : Nombre de lac naturel et de réservoir en France et dans le Monde issus de HydroLAKES

Figure 5 : Comparaison des surfaces et des volumes des lacs naturels et des réservoirs en France et dans le Monde

Figure 6 : Comparaison du temps de résidence moyen de l'eau des lacs naturels et des réservoirs en France et dans le monde.

Figure 7 : Comparaison de l'altitude de la surface des lacs naturels et des réservoirs en France et dans le Monde.

Figure 8 : Localisation des plans d'eau en France en fonction de leur type issu de HydroSHEDS

Figure 9 : Comparaison de la superficie du bassin versant associé au plan d'eau en France et dans le Monde.

Figure 10 : Ratio entre la superficie du plan d'eau et de celle de son bassin versant associé en France et dans le Monde.

Figure 11 : Répartition spatiale des sous-bassins versants issues de la base de données EDF

Figure 12 : Répartition spatiale des grands bassins versants issues de la base de données EDF

Figure 13 : Évolution de la forêt primaire selon la base de données LUH2

Figure 14 : Évolution de la forêt secondaire selon la base de données LUH2

Figure 15 : Évolution du couvert forestier (primaire et secondaire) sur les bassins versants EDF

Figure 16 : Listes des 25 modèles de prévision de l'érosion des sols les plus appliqués selon les enregistrements rapportés dans la base de données GASEMT.

Figure 17 : Nombre de publications selon les modèles issus de la base de données GASEMT

Figure 18 : Nombre de publications classées par agent érosif dans la base de données GASEMT

Figure 19 : Données d'entrée utilisées pour l'estimation des facteurs de perte de sol pour l'Europe dans RUSLE.

Figure 20 : Bases de données d'occupation des sols passée couvrant l'ensemble de la période temporellement et spatialement.

Figure 21 : Bases de données d'occupation des sols future couvrant l'ensemble de la période temporellement et spatialement.

Figure 22 : Schéma des grandes étapes de la méthodologie.

Figure 23 : représentation de la répartition spatiale des différents types d'occupation des sols.

Figure 24 : valeur du C-Facteur associé à chaque type d'occupation du sol.

Figure 25 : Comparaison des bases de données d'occupation des sols.

Figure 26 : Scenarios SSP - Shared socio-economic pathways scenarios.

Figure 27 : LUH2 land-use scenarios.

Figure 28 : Sous bassins versants hydrographiques HydroSHEDS

Figure 29 : Corrélation RUSLE-LUH2 et IRSTEA pour les grands bassins versants EDF pour 2006

Figure 30 : Évolution de l'érosion des sols autour des réservoirs avec le modèle RUSLE contraint avec les données d'LUH2 en forçage temporel sur la période 1850-2100.

Figure 31 : Évolution de l'érosion des sols autour des lacs naturels avec le modèle RUSLE contraint avec les données d'LUH2 en forçage temporel sur la période 1850-2100.

Figure 32 : Fractions harmonisées de la surface mondiale d'utilisation des terres 850-2015 (base historique) et 2015-2100 pour les huit scénarios futurs du RCP selon LUH2.

INTRODUCTION

Le limon est la poussière de l'eau, comme la cendre est la poussière du feu. Cendre, limon, poussière, fumée donneront des images qui échangeront sans fin leur matière. Par ces formes amoindries les matières élémentaires communiquent. Ce sont en quelque sorte les quatre poussières des quatre éléments. Le limon est une des matières les plus fortement valorisées. L'eau, semble-t-il, a, sous cette forme, apporté à la terre le principe même de la fécondité calme, lente, assurée.

L'eau et les rêves — Essai sur l'imagination de la matière (1942)
Gaston Bachelard

Souvent source d'inspiration littéraire, allant de Michelet à Bachelard, en passant par Victor Hugo et Jules Verne, l'eau est aujourd'hui au centre des enjeux sociaux, politiques et environnementaux, comme en témoignent les réflexions multidimensionnelles portées sur ce sujet par Olivier Rey dans son ouvrage *Réparer l'eau*. Dans un contexte de réchauffement climatique, les problématiques liées à l'hydrographie font l'objet d'une attention particulière qui se matérialise par le déploiement de programmes politique et scientifique visant à mieux comprendre l'évolution des multiples enjeux liés à la ressource eau. Ainsi, dans le cadre du programme « Horizon Europe », l'Union européenne a identifié cinq principaux objectifs, à atteindre d'ici 2030, organisés en différentes missions. « Starfish 2030 » est la mission développée pour répondre à l'objectif de protection des océans, des mers, des lacs, des fleuves et des rivières, et s'organise autour de cinq axes essentiels, à l'image d'une étoile de mer (Figure 1).

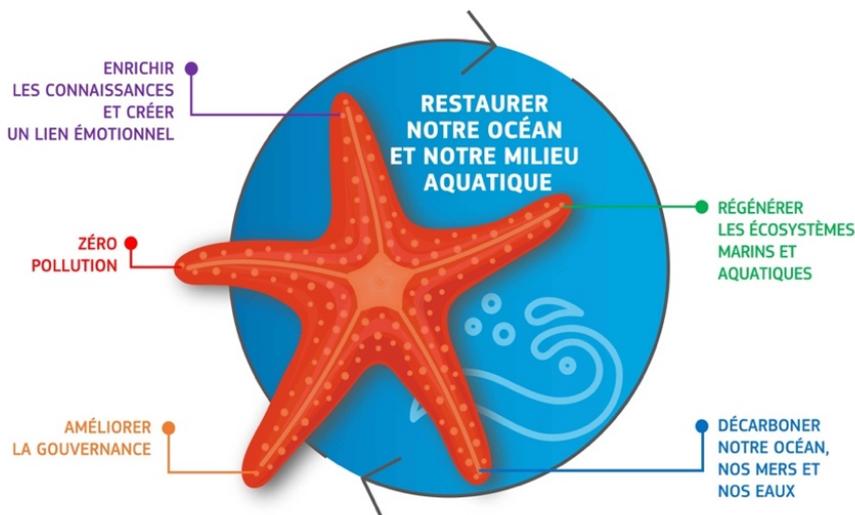


Figure 1 : Mission Starfish 2030

Source : Union européenne, 2020

Un des axes de cette mission se nomme « décarboner notre océan, nos mers et nos eaux ». Cet objectif met en jeu, et en lien, l'hydrographie et l'élément carbone, et permet de mettre en évidence l'importance pour notre société de mieux comprendre le rôle des cycles biogéochimiques et leur

évolution dans ce contexte de réchauffement global, afin d'évaluer les conséquences de ces changements sur les masses d'eau.

Il est avéré qu'à l'Anthropocène, époque géologique qui se caractérise par l'avènement des hommes comme principale force de changement sur Terre, l'accélération de l'érosion liée aux activités humaines dégrade les sols et augmente de manière significative les exports de sédiments et de carbone vers les milieux aquatiques. Cette intensification des flux ont des conséquences sur l'état physico-chimique, biologique et sur la qualité des plans d'eau, notamment les lacs et les réservoirs. Ces propos sont confirmés par Chassé et al. (2022) qui explique « qu'à la période qui s'ouvre, celle de l'Anthropocène, le cycle du carbone est bouleversé et les sols pourraient jouer un rôle central dans l'atténuation ou l'accélération du dérèglement climatique en cours ». Si « les sols constituent un acteur clé du cycle du carbone terrestre » (Chassé et al., 2022), la compréhension des processus de surface, tel que l'érosion dans le bouleversement des cycles biogéochimiques devient primordiale. Cette idée est confirmée par les études de Panagos et al. (2015) qui mettent en évidence qu'à l'échelle de l'Europe les taux de dégradation des sols dû à l'érosion dépassent souvent en intensité les taux de formation des sols (Alewell et al., 2015). Panagos et al. (2015) ajoute que « Soil erosion is among the eight soil threats listed within the Soil Thematic Strategy of the European Commission (EC, 2006). Ainsi, au cours de la dernière décennie, les problématiques liées à l'érosion des sols ont été inscrites à l'ordre du jour environnemental de l'Union Européenne en raison de l'influence de ce processus sur la production alimentaire, la qualité de l'eau potable, les services écosystémiques, les inondations boueuses, l'eutrophisation, la biodiversité et la diminution des stocks de carbone (Boardman and Poesen, 2006). Ce contexte précise l'ampleur des défis liés à l'érosion, pour les sols et pour les écosystèmes aquatiques en aval.

Cette étude cherche à mieux comprendre et quantifier l'érosion des sols vers les milieux aquatiques et portera plus spécifiquement sur les plans d'eau français en établissant une distinction entre lacs naturels et anthropiques. Ces recherches s'inscrivent dans un contexte plus large dont l'objectif *in fine* est de mieux comprendre les flux latéraux de carbone. En effet, si les flux verticaux de carbone sont plutôt bien estimés et renseignés dans la littérature, l'étude des flux latéraux de carbone, plus récente, est moins documentée et plus complexe à estimer. Cette idée est partagée par Panagos et al. (2015) « The soil organic carbon (SOC) cycle, for instance, is strongly affected by erosion, since large quantities of sediments and SOC are moved and re-deposited over the landscape ». Puisqu'une part du cycle du carbone est liée aux processus de surface qui transportent des particules d'amont en aval, la compréhension de l'évolution des exports de carbone au sein des écosystèmes lacustres français, passe par l'analyse de l'évolution des flux de l'érosion des sols autour des plans d'eau en France.

Ainsi, ces dernières années, des modèles (statistiques ou mécanistes) sont développés dans l'idée de mieux quantifier l'érosion autour des plans d'eau sur la période actuelle. Cependant ces approches sont encore peu utilisées sur des périodes longues de l'ordre de plusieurs décennies à des centaines d'années, limitant par conséquent la prise de recul nécessaire pour repositionner les changements en cours et appréhender le devenir des flux via les scénarios futurs. Dans ce projet, nous proposons d'utiliser un modèle existant d'érosion afin de simuler l'érosion autour des plans d'eau français. Le modèle semi-empirique RUSLE est un modèle d'érosion largement admis par la communauté scientifique, même s'il est régulièrement questionné et revisité. Ce modèle pourrait ainsi aider à mieux connaître les tendances d'évolutions et les facteurs principaux de contrôle. Dans ce projet, la démarche consiste à utiliser les paramètres de calage existant du modèle RUSLE pour les sols en Europe. Le développement propre à cette étude repose sur l'adaptation du modèle pour les

échelles de temps long, en introduisant de nouvelles données temporelles de forçage du modèle liés à l'occupation du sol. La validation du modèle adapté aux périodes longues a été testée à partir de données d'érosion disponibles pour l'ensemble du réseau de barrages EDF. Après validation, le modèle a permis de simuler l'érosion à l'ensemble des plans d'eau français (>10 ha). Les tendances d'érosion seront comparées entre retenues naturelles et artificielles (réservoirs), et des scénarios d'évolution des usages des sols fondés sur les scénarios du GIEC seront testés pour les prochaines décennies.

L'érosion est le phénomène au centre de notre étude et Jean-Benoît Bouron définit ce processus comme étant « un ensemble de phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, modifient le relief par enlèvement de matière solide ». Les scientifiques distinguent deux principaux types de phénomènes qui interagissent entre eux : les processus chimiques « avec altération et dissolution par les eaux plus ou moins chargées de gaz carbonique » (Bourbon, 2023), phase correspondant à l'ablation du substrat (Rey et al. 2004) et les processus physiques ou mécaniques « avec désagrégation des roches et enlèvement des débris par un fluide, d'où les distinctions entre les érosions éolienne, fluviatile, glaciaire, marine » (Bourbon, 2023) qui correspond au transport et au dépôt de sédiments érodés (Rey et al. 2004). Ainsi, les deux types d'érosion qui prédominent sont l'érosion hydrique, par l'eau, et l'érosion éolienne par le vent. Cependant, Chassé et al. (2022) indique que la majorité de l'érosion est d'origine hydrique. Ces propos font consensus dans la littérature scientifique et sont confirmés par Panagos et al. (2015) qui indique que « soil erosion by water accounts for the greatest loss of soil erosion in Europe compared to other erosion processes (e.g. wind erosion) ». Ainsi, dans ce travail de recherche, nous nous focaliserons sur l'érosion hydrique qui sera au centre de cette étude. Cette ablation physique des sols qui ne se reconstitue plus, engendre un transfert des matériaux qui se désagrègent en surface et qui sont transportés et déposés en aval sous forme de sédiments.

Les premiers réceptacles en aval sont les écosystèmes limniques. Dans ce travail nous nous concentrerons plus particulièrement sur les lacs et les réservoirs. Dans leur ouvrage *Les grands lacs à l'épreuve de l'anthropocène* Dorioz et al. reprend une expression poétique d'Alphonse Forel, fondateur, à la fin du XIX^{ème} siècle, de la limnologie, qui qualifie les lacs « d'îles d'eau » et les définit comme étant des « masses d'eau stagnantes, sans communication directe avec la mer, situées dans une dépression du sol fermée de tous côtés ». Cette première définition énoncée par le père de la limnologie est revue et précisée par Touchart (2002) permettant dès lors de distinguer les lacs des autres plans d'eau comme les étangs, ou les zones humides par exemple. Ainsi, le géographe et limnologue français définit un lac comme « un plan d'eau continental, séparé de la mer, dominé par son bassin d'alimentation et développant son caractère propre dont la superficie, la profondeur et le volume sont suffisants pour provoquer une zonation, un étagement ou une régionalisation des processus limniques ». Cette définition permet d'introduire le concept de « bassin d'alimentation » fondamental pour l'étude de l'érosion des sols. C'est ainsi que nous définissons les retenues naturelles dans notre étude. *A contrario*, nous considérons comme retenues artificielles les réservoirs et les barrages d'EDF. Le cas spécifique des barrages illustre les impacts directs de l'érosion, comme l'indiquent les vitesses élevées d'accumulation sédimentaires qui peuvent avoir des conséquences sur le comblement, le fonctionnement et l'entretien des retenues.

Le bassin versant est l'unité de base pour l'étude scientifique de l'hydrographie. Un bassin versant se définit comme la surface topographique où tous les écoulements, en surface ou en profondeur, se dirigent vers un exutoire commun (cours d'eau, lac ou mer) (Bourbon, 2023). Le bassin versant est délimité par la ligne de partage des eaux. Ces lignes sont des frontières naturelles dessinées par le relief : elles correspondent aux lignes de crête. Le bassin versant d'un fleuve est divisé en plusieurs sous-bassins versants emboîtés pour chacun de ses affluents. Durant son parcours la rivière reçoit et collecte les eaux provenant de tous les points du bassin versant : l'eau de ses affluents, l'eau de pluie, de la fonte des glaciers, d'origine souterraine. L'eau de la rivière se charge ainsi en sédiments et transporte en aval les particules de taille variable composées de sables de limon pour les plus fines mais aussi de galets ou de graviers. (OFB) Les caractéristiques topographique, géologique, pédologique ou encore biologique avec le type et la répartition de la couverture végétale peuvent influencer de manière considérable l'ampleur de ce transfert de sédiments. L'activité humaine pouvant perturber les caractéristiques initiales du bassin versant peut engendrer le déplacement de grands volumes de matière depuis l'amont des bassins versants vers l'aval en favorisant l'érosion des sols et en perturbant les cycles biogéochimiques. Les flux d'eau et de matière dans les bassins versants expliquent la continuité écologique et en cela le bassin versant est considéré comme l'unité la plus adaptée pour l'étude de l'eau (Figure 2).



Figure 2 : L'érosion dans le bassin versant

Source : Nivresse - Agence française pour la biodiversité, 2018

L'étendue spatiale de l'étude est la France métropolitaine et plus précisément, les bassins versants lacustres français. Le cadre temporel de cette étude est 1850-2100. La date de début marque un tournant dans la Révolution industrielle par la multiplication des innovations technologiques qui changent considérablement le paysage économique, social, politique et culturel de l'Europe. Le choix

de chercher à faire des prédictions jusqu'à 2100, nous permet de s'aligner sur les différents scénarios d'évolution définis par le GIEC.

Ainsi, l'objectif de cette étude est de mettre en évidence, comment l'érosion autour des réservoirs et autour des lacs naturels a-t-elle évolué entre 1850 et aujourd'hui et comment ces flux pourraient t-ils évoluer d'ici 2100 ?

Dans ce travail, nous présenterons d'abord les caractéristiques de la zone d'étude qui seront détaillées pour une lecture pertinente de l'érosion des sols, permettant de justifier le choix d'introduire des données temporelles de forçage du modèle liés à l'occupation du sol pour reconstruire et prédire les tendances à long terme de l'érosion. Par la suite un état de l'art présentera de manière synthétique le modèle d'érosion choisi, ainsi que les différentes bases de données existantes pour l'occupation des sols sur la période 1850-2100. En sera suivi, la méthodologie adoptée. Les résultats obtenus seront ensuite présentés en ce qui concerne la validation du modèle choisi, ainsi que la reconstitution des tendances de l'érosion pour les plans d'eau en France, des lacs naturels et des réservoirs. Enfin, une discussion générale permettant d'émettre un regard critique sur l'approche utilisée et les résultats concernant les chroniques des flux d'érosion.

CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE

1. Les plans d'eau en France

Les plans d'eau sont les principaux objets de notre étude. En ce sens, il est essentiel de préciser les particularités des plans d'eaux français. Pour caractériser les plans d'eau en France nous utilisons dans cette étude la base de données HydroSHEDS qui offre un ensemble de couches vectorielles, dont HydroLAKES qui fournit des données de tous les lacs du monde ayant une superficie d'au moins 10 ha (Figure 3).

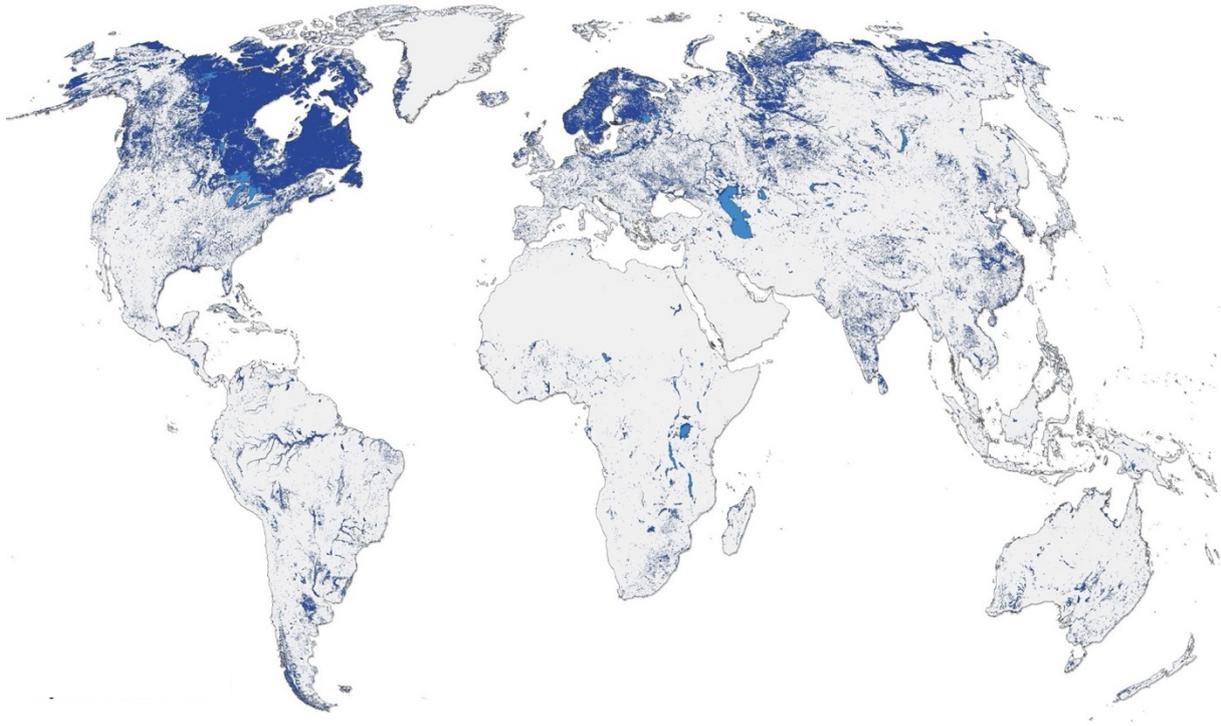


Figure 3 : Plans d'eau issus de HydroLAKES selon la base de données HydroSHEDS
Source : HydroSHEDS

1.1. Distinction entre plans d'eau naturels et artificiels

Les différentes analyses et statistiques présentées ci-dessous sont réalisées sur le nombre de plans d'eau renseigné dans le tableau ci-dessous. (Figure 4)

	Lac naturel	Réservoir
France	2474	112
Monde	1417624	6575

Figure 4 : Nombre de lacs naturels et de réservoirs en France et dans le Monde issus de HydroLAKES
Source : Valentine Sollier

Dans l'idée d'établir une distinction entre l'érosion autour des lacs naturels et des retenues artificielles, des indicateurs caractéristiques des plans d'eau sont présentés. Ces éléments peuvent être importants pour caractériser les plans d'eau et analyser par la suite les flux d'érosion et à long terme

les flux latéraux de carbone. Les premières variables analysées sont la surface et le volume des plans d'eau (Figure 5), permettant d'avoir un premier aperçu de ces objets d'étude.

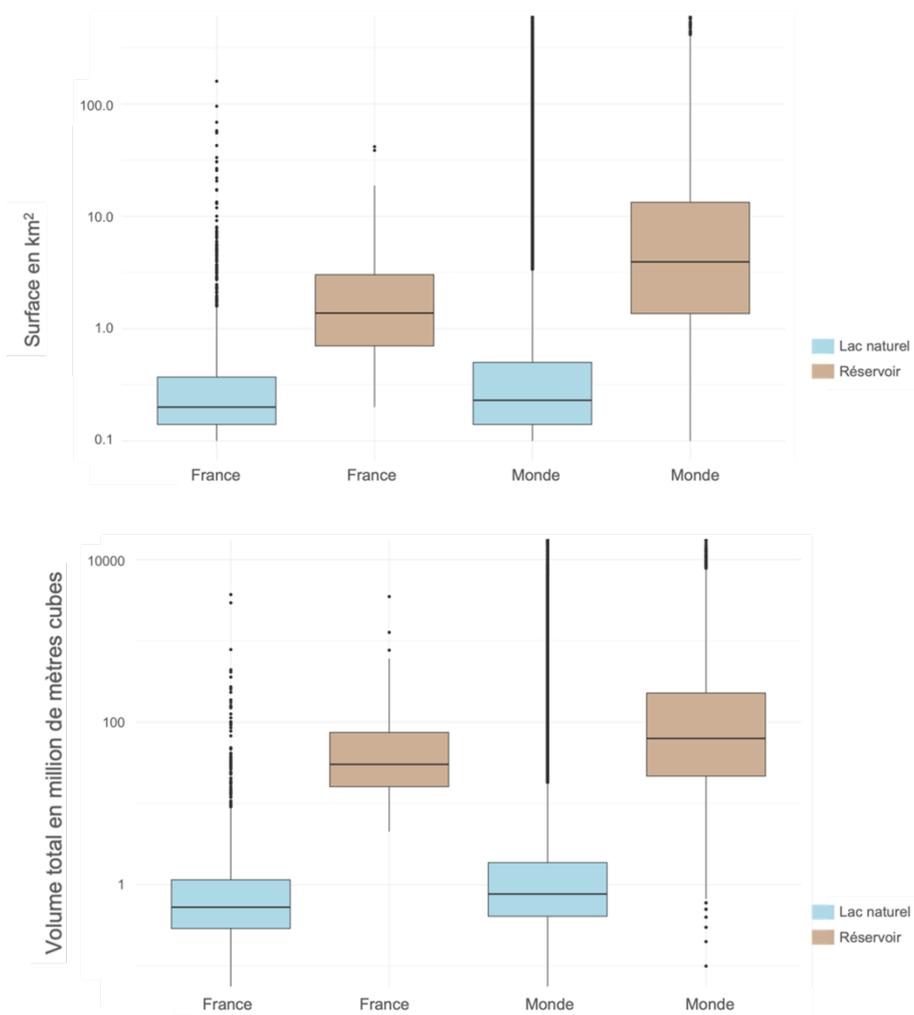


Figure 5 : Comparaison des surfaces et des volumes des lacs naturels et des réservoirs en France et dans le Monde
Source : Valentine Sollier

Les premières observations mettent en évidence une opposition nette entre les lacs naturels et artificiels en France et dans le monde. En France comme dans le monde les surfaces et les volumes des lacs artificiels sont nettement supérieurs aux lacs naturels. Le territoire français est en ce sens représentatif de ces différences entre les deux types de plans d'eau. Ces représentations statistiques montrent que si pour la caractéristique de surface, les lacs naturels en France sont représentatifs des lacs naturels dans le monde, avec une surface médiane pour les lacs naturels en France à 0.2 km² contre 0.23 km² dans le monde, ce n'est pas le cas des réservoirs français. En effet, la surface médiane des réservoirs français est près de trois fois inférieure à celle des réservoirs dans le monde. La médiane des réservoirs dans le monde, 3.92 km² est supérieure au troisième quartile des réservoirs français.

En ce qui concerne les volumes, la différence entre les différents types de retenues est davantage prégnante. Si en France, les lacs naturels présentent un volume médian de 0.5 Mm³, celui des réservoirs est plus de 60 fois supérieur avec un volume de 30.3 Mm³. Cette tendance est conservée à l'échelle mondiale avec un volume de plus de 80 fois supérieur pour les réservoirs que les lacs

naturels. Ces différences de proportions s'expliquent par le fait que les réservoirs sont construits pour répondre à des besoins.

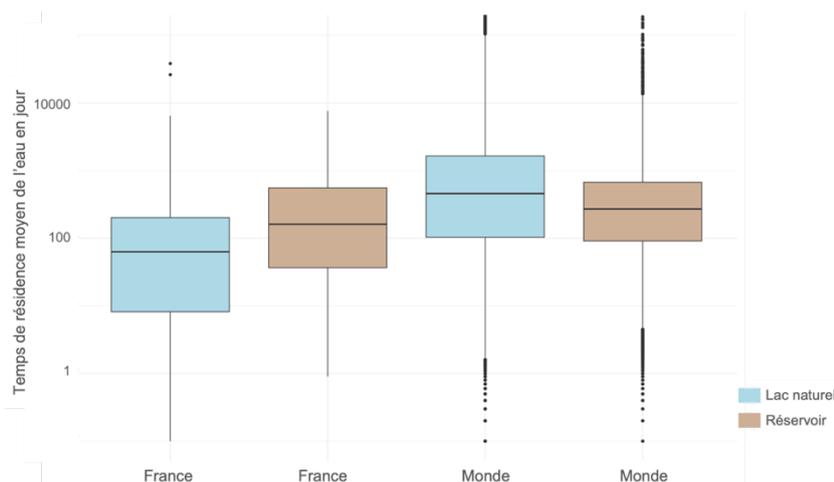


Figure 6 : Comparaison du temps de résidence moyen de l'eau des lacs naturels et des réservoirs en France et dans le monde.

Source : Valentine Sollier

Le temps de résidence moyen de l'eau (Figure 6) peut être une caractéristique essentielle pour l'étude des flux d'érosion et des flux latéraux de carbone puisque cette variable a des effets sur la sédimentation. En France, les temps de résidence de l'eau sont inférieurs à ceux dans le monde quelque soit le type de plan d'eau considéré. De plus si dans le monde, le temps de résidence de l'eau est inférieur pour les réservoirs, ces statistiques montrent des tendances inverses pour les plans d'eau français avec un temps de résidence supérieur pour les réservoirs.

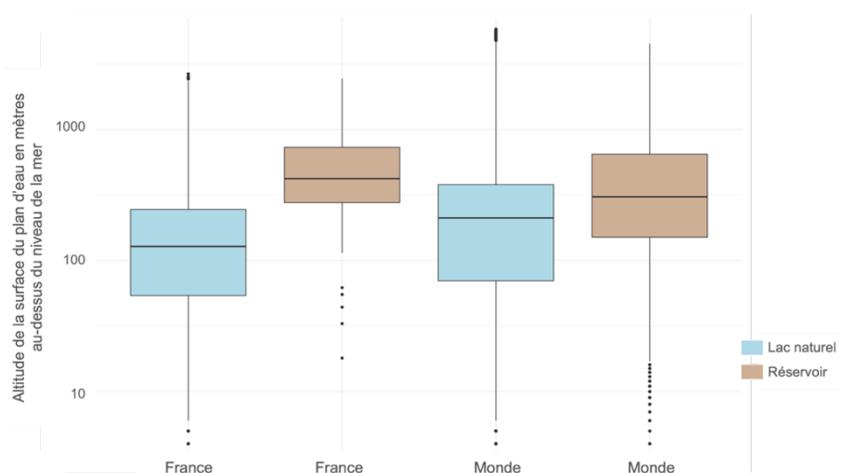


Figure 7 : Comparaison de l'altitude de la surface des lacs naturels et des réservoirs en France et dans le Monde.

Source : Valentine Sollier

L'altitude (Figure 7) est également une variable qui permet d'établir une distinction entre les différents types de plans d'eau. En France, les lacs naturels présentent une médiane à 110m d'altitude, alors que celle des réservoirs se trouve à plus de 420m. Une autre caractéristique des réservoirs est que ces derniers sont concentrés en altitude comme en témoigne la faible étendue de la distribution

des valeurs. *A contrario*, les lacs naturels présentent une étendue bien plus importante, mettant en évidence la présence de lacs de plaine situés à quelques dizaines de mètres d'altitude mais également des lacs de montagne se situant à plus de 2000m d'altitude. La carte de localisation des plans d'eau en France (Figure 8) met en évidence la répartition spatiale des lacs naturels et artificiels et montre que ces derniers se concentrent dans les massifs montagneux français : les Alpes, le Massif Central et les Pyrénées.

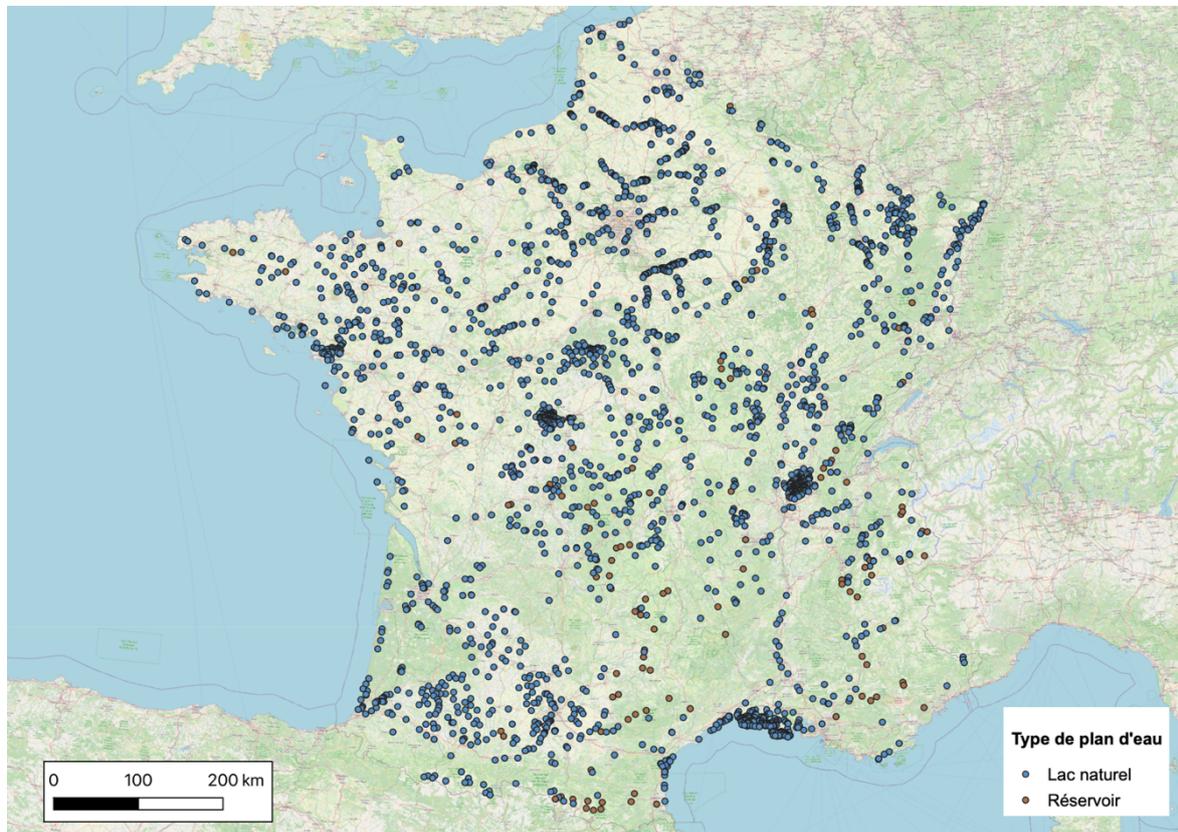


Figure 8 : Localisation des plans d'eau en France en fonction de leur type issue de HydroSHEDS

Source : Valentine Sollier

Cette situation géographique en altitude des réservoirs, s'explique par le fait que ces plans d'eau répondent à des besoins en hydroélectricité nécessitant une importante hauteur de chute (différence d'altitude entre le barrage et la centrale hydroélectrique associée située en aval). Plus cette hauteur est importante, plus la quantité d'énergie produite est grande. Blanchon (2022) indique que la charge sédimentaire est plus importante dans les régions de montagne. Ces propos viennent donner de l'importance à cette variable d'altitude, indiquant que les plans d'eau situés sur ces hauteurs peuvent être davantage soumis au processus d'érosion.

1.2. Les bassins versants associés aux plans d'eau

La taille et les caractéristiques des bassins versants conditionnent directement l'érosion des sols. De plus, le bassin versant étant l'unité de base pour l'étude scientifique de l'eau, comprendre les différences de caractéristiques entre les bassins versants des lacs naturels et des lacs artificiels est essentiel.

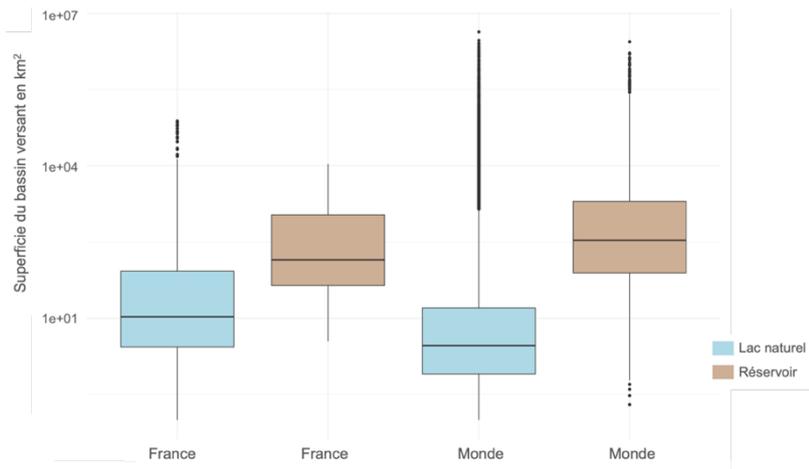


Figure 9 : Comparaison de la superficie du bassin versant associé aux plans d'eau en France et dans le Monde.
Source : Valentine Sollier

Dans HydroSHEDS la superficie du bassin versant est calculée en dérivant et en mesurant la zone de contribution en amont du point de déversement du lac à l'aide de la carte du réseau hydrographique d'HydroSHEDS avec une résolution de 15 arcsec. Si la superficie des bassins versants des réservoirs est plus grande que celle des lacs naturels, à l'échelle mondiale ces bassins sont trois fois plus grands que sur le territoire français. *A contrario*, la superficie médiane des lacs naturels français, 10.7 km² est plus de 3,5 fois supérieure aux bassins versants dans le monde (Figure 9).

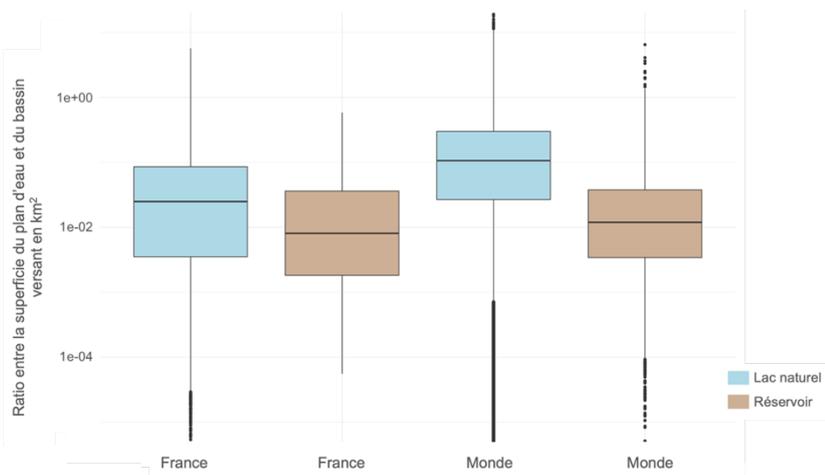


Figure 10 : Ratio entre la superficie du plan d'eau et de celle de son bassin versant associé en France et dans le Monde.
Source : Valentine Sollier

L'observation qui met en évidence la plus grande superficie des bassins versants des réservoirs paraît s'accorder avec le fait que les réservoirs possèdent une superficie largement supérieure aux lacs naturels. Cependant, le ratio entre la superficie du bassin versant et celle du plan d'eau associé (Figure 10) montre que le ratio est plus élevé pour les lacs naturels que pour les réservoirs.

Ainsi, les sous-bassins versants répertoriés dans la base de données IRSTEA de EDF sont présentés ci-dessous (Figure 11). Ces sous bassins versants peuvent être regroupés en grands bassins versants (figure 12). Cette dernière échelle d'étude peut être plus commode à utiliser pour les analyses. Ces bassins versants sont associés à l'ensemble des ouvrages EDF.

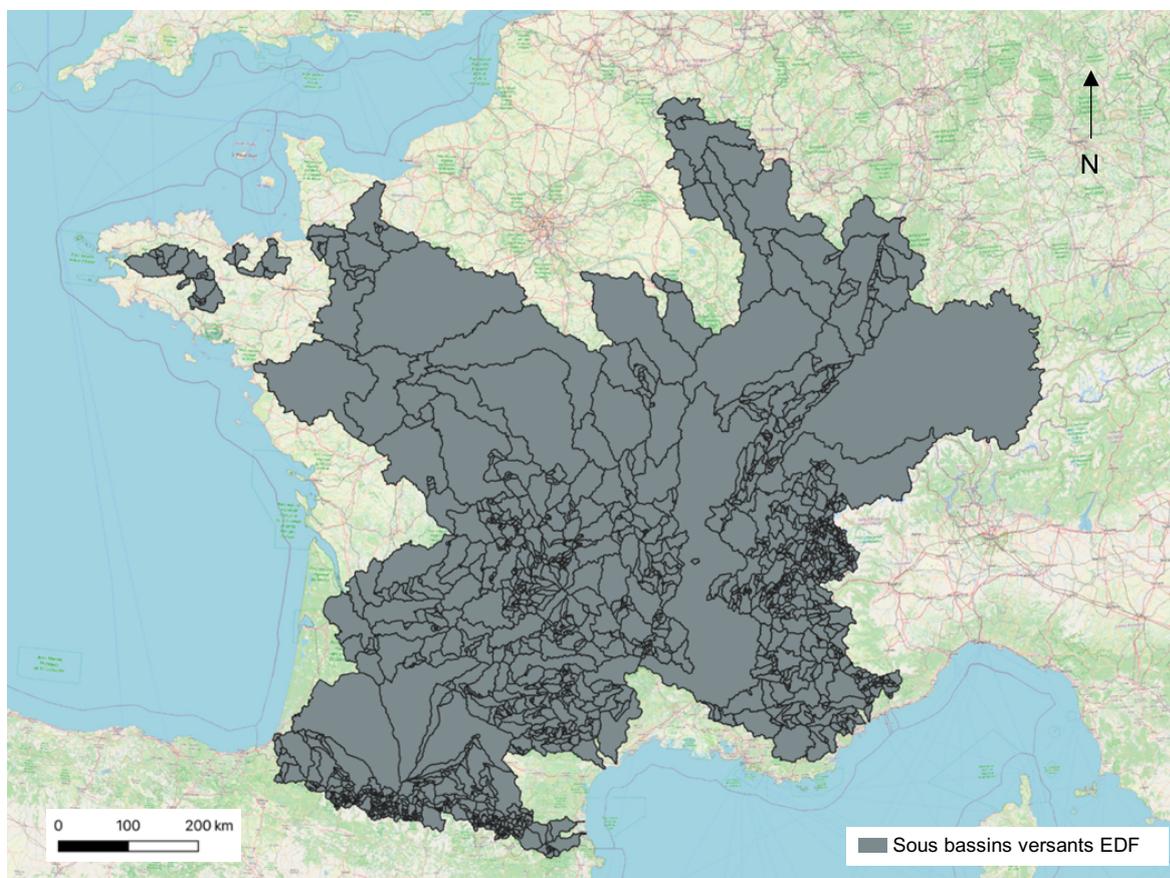


Figure 11 : Répartition spatiale des sous-bassins versants issues de la base de données EDF
Source : Valentine Sollier

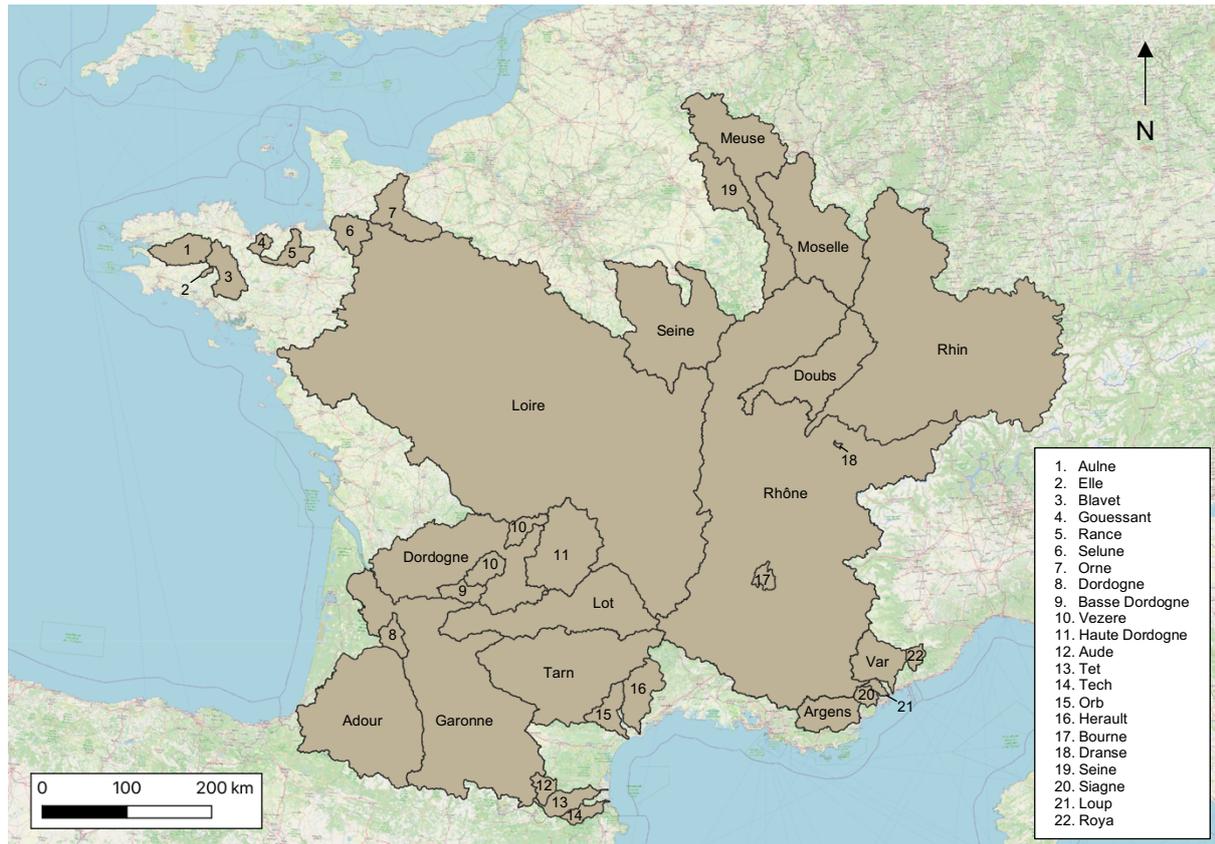


Figure 12 : Répartition spatiale des grands bassins versants issues de la base de données EDF

Source : Valentine Sollier

2. L'occupation des sols : le couvert forestier

2.1. Focalisation sur la forêt : une variable importante pour le contrôle de l'érosion

Le choix d'analyser le couvert forestier pour caractériser la zone d'étude et l'importance particulière portée sur cette variable s'explique par l'ampleur de l'influence de la végétation sur l'érosion des sols. Des études scientifiques mettent en évidence l'importance du couvert végétal dans le processus d'érosion. Langlois et Thomas expliquent que « la présence d'un couvert végétal, et surtout d'un couvert forestier change complètement l'intensité de l'altération et de l'érosion » (2016). Ainsi, la végétation se présente comme un outil de contrôle et d'atténuation de ce processus d'érosion. Comprendre la distribution du couvert forestier devient dès lors pertinent, puisque cette variable renseigne de manière significative sur l'érosion.

La maîtrise de l'érosion par la végétation se fait à deux niveaux comme le décrit Rey et al. (2004) en mettant en avant le fait que « la végétation peut intervenir contre l'érosion hydrique de surface de deux manières principales : d'une part, elle peut empêcher l'ablation du substrat, d'autre part, elle peut favoriser la sédimentation, en retenant les sédiments érodés plus à l'amont ». Le premier de ces deux aspects évoqués se matérialise par le fait que la végétation joue un rôle déterminant dans la réduction de l'énergie de l'érosion pluviale. En effet, le couvert végétal, en interceptant les gouttes de pluie, grâce à la canopée, joue un rôle de protection mécanique en diminuant l'énergie cinétique de la pluviométrie. Par exemple, « en forêt, les précipitations inférieures à 2 mm en 24 heures sont

presque entièrement interceptées » (Rey et al., 2004). D'une autre manière, la végétation joue également un rôle essentiel dans la réduction du ruissellement. La perméabilité, une des caractéristiques physiques essentielles d'un sol forestier, favorise les infiltrations de l'eau dans le sol, limitant donc le ruissellement. Heathwaite et al. (1990) explique qu'un pâturage intensif peut avoir pour conséquences une réduction de l'infiltration de l'eau dans les sols de plus de 80 %, augmentant ainsi le ruissellement d'un rapport de 1 à 12 par rapport à des terrains similaires non pâturés. Néanmoins, dans l'idée de nuancer ces propos, il est possible de souligner que lors d'événements pluvieux extrêmes ou abondants, la capacité du couvert forestier à réduire le ruissellement est fortement amoindrie. Par exemple, des analyses montrent que pour des pluies supérieures à 100 mm en 24 heures avec une intensité supérieure à 45 mm h^{-1} , la végétation ne joue pratiquement plus son rôle initial de réduction du ruissellement. (Rey et al., 2004)

Le second aspect, correspondant au rôle de la végétation en faveur de la sédimentation est largement reconnu et décrit dans la littérature. En effet, le couvert forestier favorise le piégeage de sédiments ce qui favorise la stabilisation des sols. Les racines maintiennent les sédiments sur la pente et contribuent à la stabilisation du sol.

Selon les études, les scientifiques indiquent qu'à partir d'un taux de végétation supérieur à 70-75% de végétation, il n'y a quasiment plus d'érosion. Le couvert végétal a donc un effet protecteur, avec la partie aérienne des plants et du système racinaire, face à l'érosion.

Ainsi, l'occupation des sols se présente comme un facteur important pouvant influencer sur les autres facteurs qui entrent en jeu dans les processus de surface, comme la pluviométrie ou la topographie. En ce sens, il est judicieux d'accorder une importance particulière à ce facteur puisqu'il est le plus susceptible d'influer sur l'érosion.

2.2. Analyse spatiale et temporelle du couvert forestier en France

Comprendre les dynamiques passées du couvert végétal en France permet de replacer dans un contexte plus large notre période d'étude qui commence en 1850. Cette analyse spatiale et temporelle sur des périodes longues implique un choix méthodologique important, celui de la base de données utilisée. LUH2 est la base de données choisie pour représenter et analyser l'histoire de l'évolution du couvert forestier pour comprendre l'érosion des sols.

2.2.1. Focalisation sur la France dans un contexte européen

Les premières observations montrent que malgré l'importante amplitude de l'évolution du taux du couvert forestier en France, le boisement est plutôt regroupé au Sud et à l'Est du pays sur des régions assez montagneuses. Par rapport à ses voisins scandinaves, la forêt occupe une étendue spatiale bien moins importante (Figure 13 et 14).

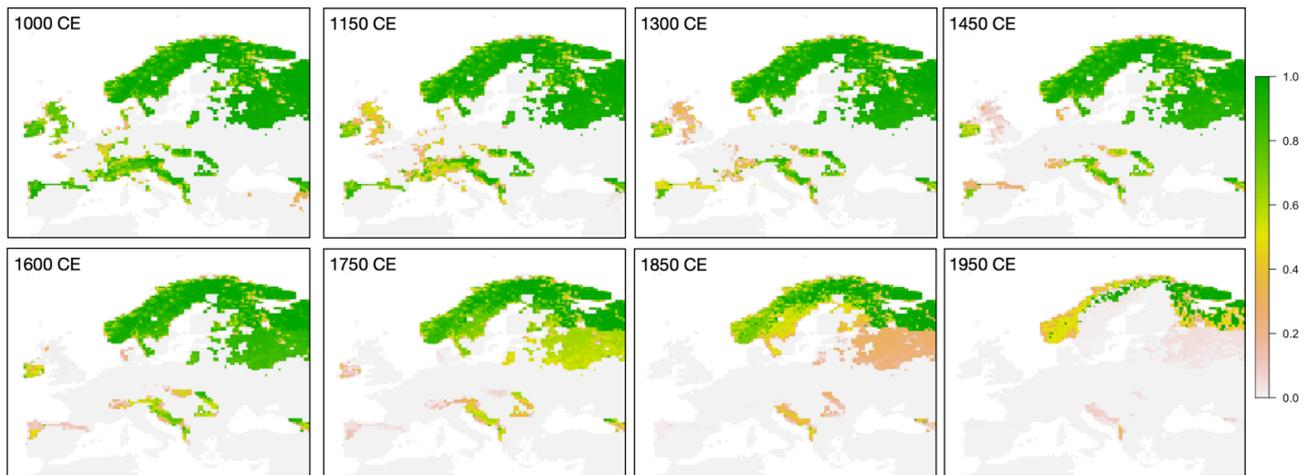


Figure 13 : Évolution de la forêt primaire selon la base de données LUH2
Source : Valentine Sollier

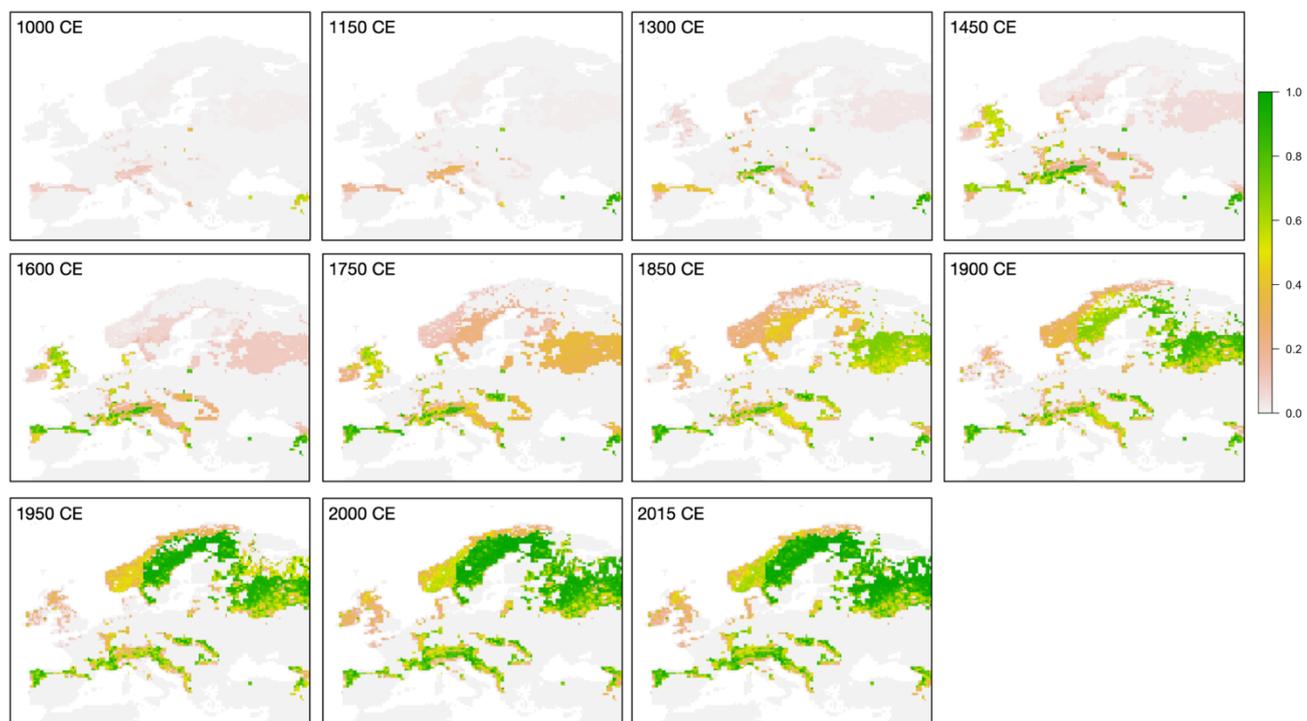


Figure 14 : Évolution de la forêt secondaire selon la base de données LUH2
Source : Valentine Sollier

La France connaît plusieurs périodes de déforestation massive. Les grands défrichements du Moyen-Âge s'expliquent par ce que G. Duly appelle la « révolution agricole médiévale » où l'apparition de progrès techniques (charrue à roue, la herse...) permet une augmentation des rendements et par conséquent une augmentation de la population. La déforestation atteint son paroxysme dans les années 1300 CE (Figures 13 et 14) puisqu'à cette date « les forêts ne représentent plus que la surface de 25% du territoire », (Gaudin, 1996) soit 13 millions d'hectares alors que 40 millions d'hectares servent à l'agriculture. Cette révolution agricole rendue possible par l'optimum climatique médiéval engendre un vaste défrichement des forêts du royaume de France, pour permettre aux paysans d'augmenter leur surface cultivable.

Cette période est suivie d'une reforestation massive, avec une expansion de la forêt secondaire (Figure 14). Le début du PAG a pour conséquence une diminution de la population, qui plus est, largement touchée par la guerre de Cent Ans et la Peste Noire, restreignant considérablement la déforestation. Après le deuxième maxima du PAG, la croissance de la population au XVII^{ème} siècle provoque une autre période de déforestation massive. Sous le règne de Louis XIV, le développement d'une flotte pour le commerce et les guerres mène à une surexploitation de la forêt française.

La dernière période de défrichement, qui concerne directement notre période d'étude, commence en 1750-1760, années qui marquent le début de l'ère industrielle, et se termine en 1840-1850. Une des caractéristiques de la révolution industrielle est qu'elle marque l'entrée dans une nouvelle ère géologique : l'Anthropocène. Au XIX^{ème} siècle, s'ajoutent aux besoins habituels en bois (construction, chauffage...), les besoins industriels. A cette période, le couvert forestier ne représente plus que 16% du territoire national. La prise de conscience de reboiser le territoire se matérialise par la promulgation d'un code forestier en 1827, par l'abandon du charbon de bois au profit de nouveaux matériaux comme l'acier notamment pour la construction et par la mise en place d'une politique de reboisement lancée par Napoléon III. Ainsi, la forêt est replantée notamment dans les Landes de Gascogne et le plan de « restauration des terrains en montagne », est une opération permettant la stabilisation et la restauration des sols montagneux, dans l'idée de ralentir l'érosion et prévenir les risques de crues. Cette idée est confirmée par les propos de Langlois et Thomas (2016) qui indiquent que « Historiquement, en France, on a surtout pris conscience de cette action protectrice des arbres au milieu du XIX^{ème} siècle ».

Cette analyse spatiale et temporelle de l'évolution de la végétation met en évidence la capacité de l'homme à influencer sur les caractéristiques de son environnement et en particulier sur l'occupation des sols. Ces transformations du paysage par le biais de l'occupation des sols et les fluctuations du taux du couvert forestier provoqué majoritairement par l'être humain justifient l'idée de faire varier temporellement le facteur C (occupation des sols) du modèle RUSLE. Ces propos sont confirmés par Garcia-Ruiz et al., (2013) qui indique que « Human activity and agricultural practices are the main drivers for soil erosion trends ». En effet, la démonstration du rôle de la végétation pour la maîtrise de l'érosion et les variations observées engendrées par l'homme, permet d'argumenter et de justifier le choix des données de forçage du modèle RUSLE. S'ajoute l'idée que l'Anthropocène est caractérisée par l'influence de l'être humain sur la géologie et les écosystèmes, devenue significative à l'échelle de l'histoire de la Terre. Cette influence passe par la modification de l'utilisation des terres, qui prend de ce fait une place centrale dans cette étude.

2.2.2. Échelle des bassins versants français

Une analyse plus précise de la végétation qui peut être davantage mise en relation avec des phénomènes d'érosion est réalisée à l'échelle des bassins versants français. Pour cette analyse, nous utilisons les bassins versants issus de la base de données EDF qui sont regroupés en grands bassins versants (Figure 12).

L'évolution du couvert forestier, forêt primaire et secondaire confondues, sur neuf grands bassins versants nationaux (Figure 15) met en évidence des patterns communs qui mettent en exergue les pics de déforestation passés évoqués. Nous nous concentrerons sur la période récente, sur laquelle porte notre étude.

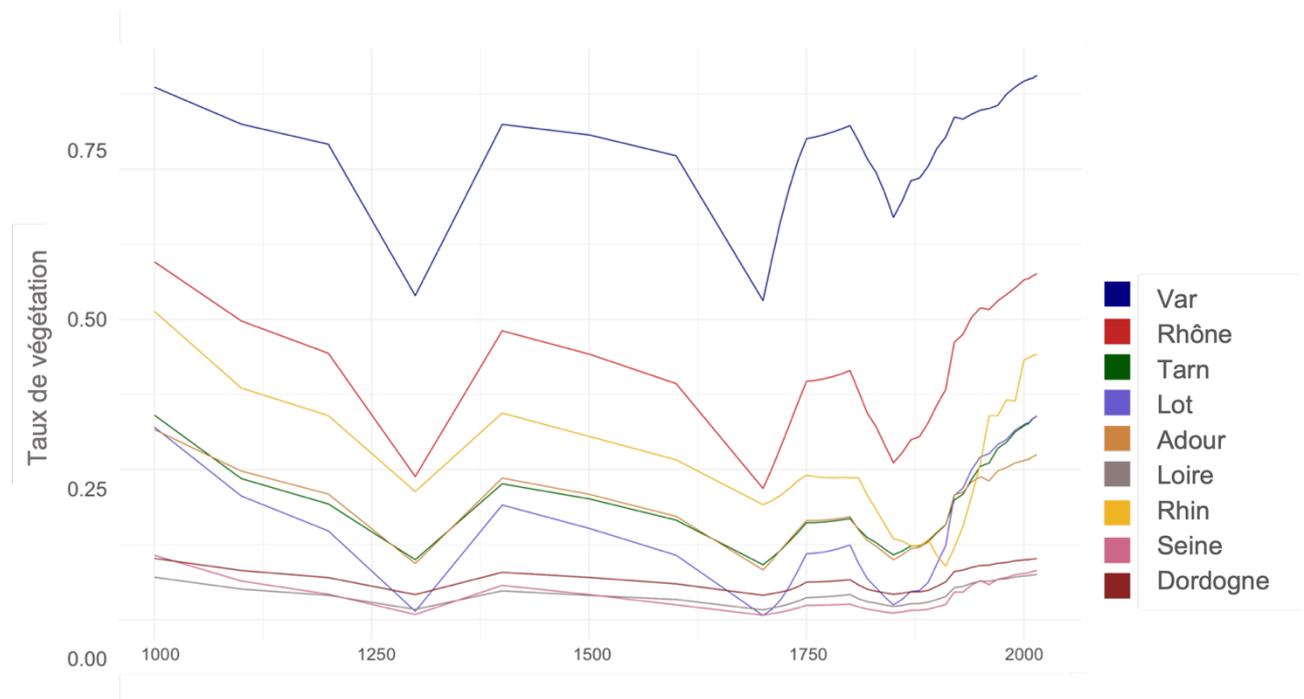


Figure 15 : Évolution du couvert forestier (primaire et secondaire) sur les bassins versants EDF selon la base de données LUH2
Source : Valentine Sollier

Le Tarn est représentatif des tendances de végétation décrites par l'ensemble des bassins versants représentés. Une analyse précise focalisée sur le Tarn vient illustrer le rôle de la végétation dans le processus d'érosion et son rôle protecteur face à la pluviométrie. Le conservateur des Eaux et Forêts, Georges Fabre, démontre « qu'une part des alluvions charriées par la Garonne et gênant la navigation provient de la rivière Tarn, et en particulier du massif de l'Aigoual, une des montagnes les plus arrosées de France puisque recevant aussi bien les pluies d'origine atlantique que méditerranéenne. Ce massif, initialement boisé, avait progressivement été déboisé depuis le Moyen Âge, avec une accélération de ce déboisement à la Révolution (abolition des privilèges et droit pour tous les nouveaux propriétaires d'exploiter les forêts) puis vers le début de la révolution industrielle qui avait besoin de beaucoup de charbon de bois pour ses fonderies ». (Langlois et Thomas, 2016). Le reboisement de l'Aigoual commence en 1875, supervisé par Georges Fabre ralentissant dès lors l'érosion des sols et l'ensablement du port de Bordeaux.

Le bassin versant du Rhin présente une anomalie par rapport au pattern partagé avec les autres bassins versants. Ce second pic de déforestation dans la période récente visible sur le bassin versant du Rhin et plus largement dans les forêts du nord-Est est lié à la guerre mondiale de 1914-1918. Jean-Paul Amat explique que les états-majors considèrent la « couverture boisée comme un fait géographique d'importance majeure » durant la guerre des tranchées. Les massifs forestiers jouent un rôle protecteur, forment un obstacle pour l'ennemi, peuvent servir de point d'appui pour la nation. La forêt devient dès lors en 1914, « un élément du système de défense ». En conséquence, Jean-Paul Amat écrit que « les impacts des combats, bombardements, mitraillages, abattage des arbres par

l'obus ou par la cognée, provoquent des destructions souvent profondes des couverts végétaux, compromirent ou épuisèrent les ressources en bois, bouleversèrent les sols ».

Ces analyses à différentes échelles indiquent des variabilités marquées du paysage au cours du temps, et suggèrent ainsi un rôle potentiellement important de la végétation dans la dynamique temporelle de l'érosion. Cette observation permet de justifier l'idée de faire varier temporellement le facteur d'occupation des sols influent grandement l'érosion et étant largement influencé par les activités humaines, d'autant plus à l'ère de l'Anthropocène.

ÉTAT DE L'ART

1. Modéliser l'érosion : le modèle RUSLE

Comme l'indique Panagos et al. (2015), la mesure directe sur le terrain des taux réels de perte de sol (qui passerait par exemple par l'échantillonnage des charges sédimentaires) est difficilement réalisable selon l'échelle considérée. En ce sens des approches de modélisation de l'érosion des sols sont mises au point afin d'évaluer un taux d'érosion.

Dans l'idée de contextualiser et de replacer le modèle utilisé, RUSLE, mis au point par Renard et al. (1997), par rapport aux autres méthodes de modélisation, il est possible de dire qu'une des premières équations permettant de quantifier l'érosion des sols date de 1940 (Zingg, 1940) et repose sur des facteurs physiques comme le climat, les caractéristiques du sol, le type de végétation et la topographie. Depuis, un grand nombre de modèles mathématiques empiriques, conceptuels, sont mis au point. Borrelli et al. (2021) indique qu'il existe 435 modèles incluant différents types d'érosion, hydrique, éolienne, qui sont référencés dans la base de données GASEMT tout en soulignant que plusieurs de ces modèles utilisent et font référence aux mêmes approches de modélisation. Borrelli et al. (2021) répertorie les 25 modèles les plus appliqués (Figure 16). Dans leurs différentes formes et applications, les modèles appartenant à la famille (R)USLE (USLE, RUSLE and USLE-SDR, RUSLE-SDR, SEDD) sont de loin les modèles de prévision de l'érosion des sols les plus largement appliqués au monde, avec plus de 1 200 applications (~ 41 % du total).

Model	Records	%	References
RUSLE	507	17.1	(Renard et al., 1997)
USLE	412	13.9	(Wischmeier and Smith, 1978)
WEPP	191	6.4	(Laflen et al., 1991)
SWAT	185	6.2	(Arnold et al., 2012)
WaTEM/SEDEM	139	4.7	(Van Oost et al., 2000)
RUSLE-SDR	115	3.9	-
USLE-SDR	64	2.2	-
LISEM	57	1.9	(De Roo et al., 1996)
Customized approach	53	1.8	-
MUSLE	52	1.7	(Williams and Berndt, 1977)
MMF	48	1.6	(Morgan et al., 1984)
AnnAGNPS	47	1.6	(Young et al., 1989)
RHEM	44	1.5	(Nearing et al., 2011)
Unknown	36	1.2	-
Erosion 3D	29	1.0	(Schmidt, 1991)
EPIC	25	0.8	(Williams et al., 1983)
PESERA	23	0.8	(Govers et al., 2003)
USPED	22	0.7	(Mitasova et al., 1996)
GeoWEPP	20	0.7	(Renschler, 2003)
RUSLE2	20	0.7	(Foster et al., 2001)
EPM	19	0.6	(Gavrilovic, 1962)
STREAM	19	0.6	(Cerdan et al., 2002)
RUSLE/SEDD	16	0.5	(Ferro and Porto, 2000)
DSESYM	15	0.5	(Yuan et al., 2015)
EUROSEM	15	0.5	(Morgan et al., 1998)

Figure 16 : Listes des 25 modèles de prévision de l'érosion des sols les plus appliqués selon les enregistrements rapportés dans la base de données GASEMT.

Source : Borrelli et al. (2021)

Largement reconnu dans la communauté scientifique comme étant l'un des modèles le plus approprié pour estimer les pertes de sol moyennes annuelles, RUSLE en étant une version révisée de USLE se présente comme un modèle adapté à notre étude. Cette large utilisation de RUSLE, croissante au cours du temps (Figure 17) indique que ce modèle a été testé sur un grand nombre de sites et à des échelles variées, ce qui oriente grandement notre choix pour représenter les flux d'érosion.

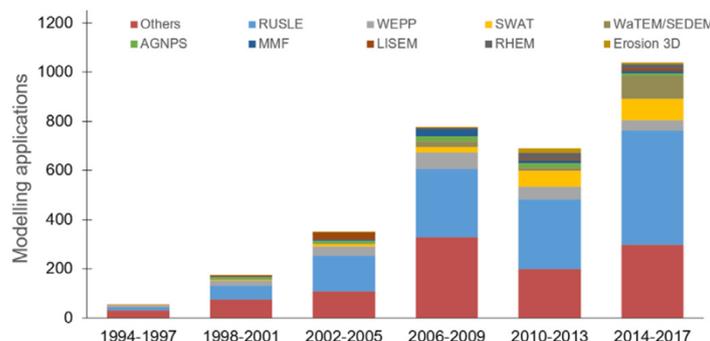


Figure 17 : Nombre de publications selon les modèles issus de la base de données GASEMT

Source : Borrelli et al. (2021)

Aujourd'hui, la majorité des études réalisées sur l'érosion concerne l'érosion hydrique (Figure 18). Comme 85 % des modèles développés jusqu'à présent, le modèle RUSLE concerne l'érosion hydrique, et tout comme la grande majorité (estimée entre 50 et 80 %) d'entre eux, se focalise sur la « long-term average annual soil loss by sheet and rill erosion ». Poesen et al., (2003) rajoute que « It should be noted that soil loss caused by (ephemeral) gully erosion is not predicted by RUSLE ». Ainsi la majorité des études concernant l'érosion des sols porte sur l'érosion hydrique (Figure 18). Cette concentration sur ce phénomène d'érosion s'explique par l'idée selon laquelle « soil erosion by water is one of the major threats to soils in the European Union, with a negative impact on ecosystem services, crop production, drinking water and carbon stocks ».

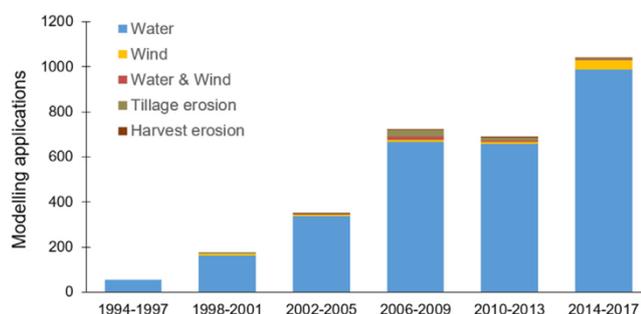


Figure 18 : Nombre de publications classées par agent érosif dans la base de données GASEMT

Source : Borrelli et al. (2021)

Le modèle RUSLE permet de calculer le taux moyen annuel d'érosion des sols grâce à cinq facteurs qui dépendent de paramètres semi-empiriques calibrés sur le terrain.

L'équation du modèle est la suivante : $E = R \times K \times C \times LS \times P$ où :

- E : perte annuelle moyenne de sol ($t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)
 R : facteur d'érosion pluviométrique ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$)
 K : facteur d'érodibilité du sol ($t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
 C : facteur de gestion de la couverture (sans dimension)
 LS : facteur de longueur et inclinaison de la pente (sans dimension)
 P : facteur des pratiques de soutien (sans dimension)

La représentation schématique réalisée par Panagos et al. (2015) met en évidence les données en entrée pour estimer les facteurs de perte de sol (Figure 19).

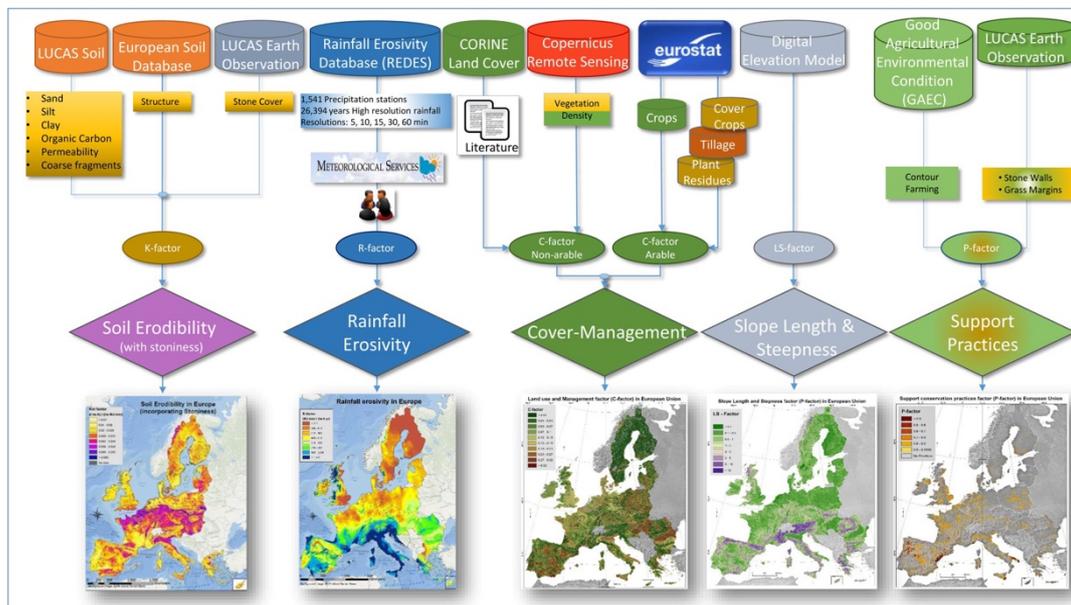


Figure 19 : Données d'entrée utilisées pour l'estimation des facteurs de perte de sol pour l'Europe dans RUSLE.

Source : Panagos et al., 2015

Un des avantages que présente le modèle RUSLE est sa structure qui permet de simuler des scénarios de changement de l'utilisation des terres (Panagos et al. 2015). En ce sens, ce modèle devient un outil pertinent pour évaluer l'érosion passée et estimer les changements d'occupation des terres pour simuler la perte de sol sur la base des scénarios futurs. De plus, Panagos et al., (2015) indique que le modèle RUSLE « will certainly help to improve the scientific knowledge of one component of the global carbon budget, which has to date often been neglected due to lack of data ». Ce modèle se révèle pertinent pour répondre aux objectifs de notre étude.

2. Reconstituer l'occupation des sols

L'analyse des pollens fossilisés et l'étude fondée sur les aspects socio-économiques sont les deux grands types de méthodologies décrites dans la littérature qui permettent de reconstituer l'occupation des sols dans le passé. La seconde méthode, largement utilisée pour la construction de

bases de données, s'appuie sur la densité de population pour comprendre et déduire les dynamiques de colonisation anthropique du paysage.

La base de données HYDE fréquemment utilisée (Klein Goldewijk et al., 2010, 2011), est représentative de la seconde méthode, a reconstitué la répartition spatiale des terres cultivées, des pâturages et des zones urbaines historiques en se fondant sur des estimations d'utilisation des terres par habitant et en s'appuyant sur des cartes démographiques, après avoir utilisé les inventaires de la FAO pour calibrer les zones d'utilisation des terres par habitant. Hurtt et al. (2011) a utilisé pour mettre au point la base de données LUH2, les classes d'utilisation des sols de HYDE comme données d'entrée, en combinaison avec des statistiques de récolte et un taux de changement brut supposé pour les cultures itinérantes. (Fuchs et al., 2014)

Ainsi, un travail de recherche a permis de renseigner et de synthétiser l'ensemble des bases de données existantes pour l'occupation des sols passée (Figure 20). Sont renseignées, seulement les bases de données correspondant à notre zone d'étude et à notre période temporelle.

BASES DE DONNÉES	HYDE	LUH2	HILDA	ISIMIP	HILDA+
VERSION DE LA BASE DE DONNÉES	HYDE 3.2	LUH2_v2h	HILDA_v2	ISIMIP3b	—
RÉSOLUTION SPATIALE	0.08°	0.25°	0.0099°	0.5°	0.0099°
COUVERTURE SPATIALE	mondial	mondial	europe	mondial	mondial
COUVERTURE TEMPORELLE	10 000 BCE - 2020 CE	850 - 2015	1899 - 2010	1850 - 2014	1899 - 2019
RESOLUTION TEMPORELLE	décénal (pour la période 1600-2020)	annuel	décénal	annuel	annuel
FORMAT DES DONNÉES	ESRI ASCII grid format	geocoded raster (NetCDF)	ESRI ASCII grid format	geocoded raster (NetCDF)	geocoded raster (NetCDF)
METHODOLOGIE DE RECONSTRUCTION	Densité de population	reconstruction de HYDE et conditions initiales (IAM)	Densité de population	reconstruction de HYDE et de LUH2	données de télédétection, FAO land use et densité de population

Figure 20 : Bases de données d'occupation des sols passée couvrant l'ensemble de la période temporelle et à la couverture spatiale étudiées

Source : Valentine Sollier

Pour la période future, le même travail de recherche a été effectué. Les bases de données renseignant des prédictions pour l'occupation des sols future s'appuie sur les différents scénarios climatiques définis par le GIEC. (Figure 21)

BASES DE DONNÉES	LUH2	LUCAS LUC	ISIMIP	GLU
VERSION DE LA BASE DE DONNÉES	LUH2_v2f	LUCAS LUC 1.0	ISIMIP2b	—
RÉSOLUTION SPATIALE	0.25°	0.1° (pour l'Europe)	0.5°	0.05°
COUVERTURE SPATIALE	mondial	mondial	mondial	mondial
COUVERTURE TEMPORELLE	2015 - 2300	2016 - 2100	2006 - 2099	2015 - 2100
RESOLUTION TEMPORELLE	annuel	annuel	annuel	annuel
FORMAT DES DONNÉES	geocoded raster (NetCDF)	geocoded raster (NetCDF)	geocoded raster (NetCDF)	geocoded raster (NetCDF)
SCENARIOS FUTURS	ensemble des scénarios SSPs - RCPs	ensemble des scénarios SSPs - RCPs	SSP1 - 2.6 SSP2 - 6.0	ensemble des scénarios SSPs - RCPs

Figure 21 : Bases de données d'occupation des sols future l'ensemble de la période temporelle et à la couverture spatiale étudiées

Source : Valentine Sollier

MÉTHODOLOGIE

1. Description générale

Le modèle RUSLE met en relation cinq facteurs pour simuler l'érosion des sols : $R \times K \times C \times LS \times P$ qui correspondent respectivement à la pluviométrie, l'érodibilité du sol, la couverture du sol, la longueur et l'inclinaison de la pente et enfin les pratiques de soutien. Si le modèle RUSLE fait l'objet d'un grand nombre d'applications, cette approche de modélisation est peu utilisée sur des périodes longues. Notre étude cherche donc à simuler sur le temps long (1850 - 2100) les chroniques d'érosion des sols sur les lac naturels et artificiels, et de pouvoir comparer l'érosion en termes d'intensité. Ces tendances temporelles peuvent s'obtenir en contraignant le modèle en passant au moins un facteur en temporel, en faisant varier dans le temps les données en entrées du modèle. Sur ces périodes de temps, des dizaines d'années, les facteurs susceptibles d'évoluer et d'avoir des conséquences sur l'érosion sont la pluviométrie et l'occupation des sols. Le choix se porte sur le facteur C, l'occupation des sols, les autres facteurs seront utilisés de façon constante. Ce choix s'explique par l'ampleur de l'influence de l'occupation des sols sur l'érosion, qui se présente comme un des facteurs les plus aggravant de l'érosion ce qui justifie la focalisation sur l'occupation des sols dans cette étude. Cette idée est mise en évidence par Borrelli et al. (2017) « Human activity and related land use change are the primary cause of accelerated soil erosion, which has substantial implications for nutrient and carbon cycling ».

Les différentes étapes suivies pour réaliser l'objectif de l'étude et obtenir les tendances temporelles d'érosion sont décrites ci-dessous (Figure 22).

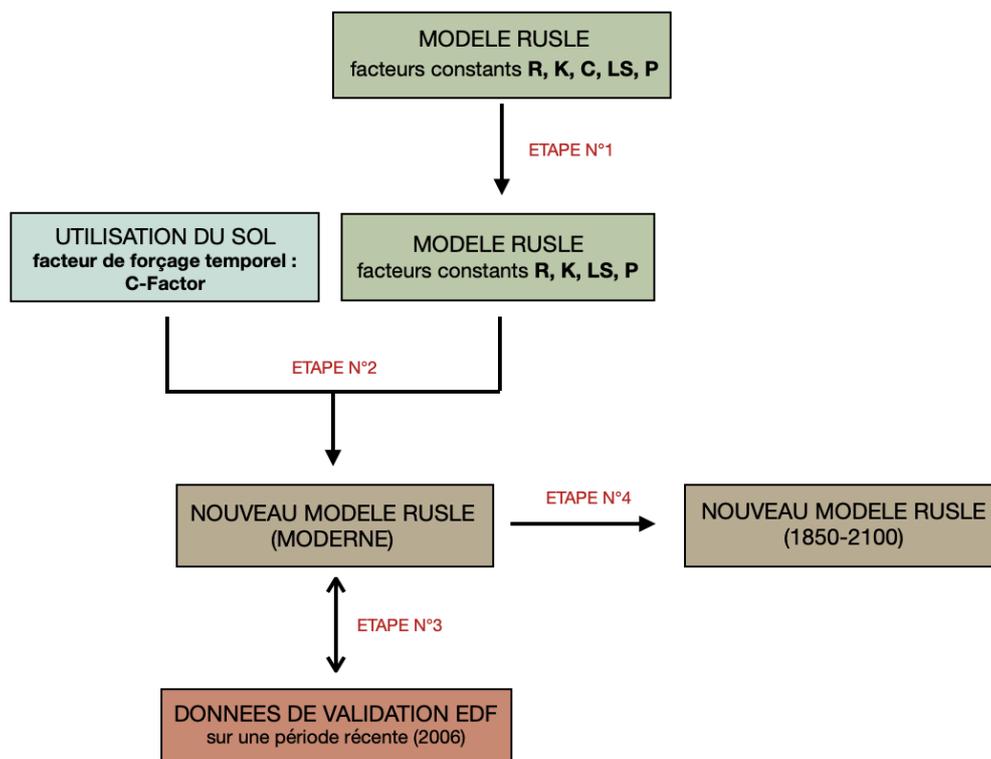


Figure 22 : Schéma des grandes étapes de la méthodologie

Source : Valentine Sollier

Initialement l'utilisation du modèle RUSLE se matérialise par l'utilisation de cinq rasters qui correspondent aux cinq facteurs du modèle RUSLE : $R \times K \times C \times LS \times P$. Les rasters sont disponibles sur le site de la Joint Research Centre. Ainsi, pour répondre à ce besoin de temporalité, il est nécessaire de faire varier un facteur en fonction du temps sur l'ensemble de notre période temporelle. Le choix de notre facteur de forçage temporel, expliqué au préalable, se porte sur l'occupation des sols : le C-Facteur.

L'idée est donc de contraindre le modèle RUSLE avec des données d'occupation du sol. Parmi l'ensemble des données répertorié dans l'état de l'art, le choix de la base de données, expliqué par la suite, se porte sur LUH2. La récupération des données LUH2 passées et futures et son exploitation passe ensuite par un reformatage des données. Si initialement lors de la récupération des données LUH2, les différents types d'occupation des sols contiennent les dates avec des valeurs associées, il est nécessaire de reformater les données pour obtenir un raster par année qui contient l'ensemble des valeurs d'occupation des sols pour les différents types décrits par la base de données. Avant de remplacer le raster C initial dans RUSLE par le raster C temporel associé à chaque année, il est nécessaire de le convertir en C-Facteur. Chaque raster d'occupation du sol délimite spatialement les différentes catégories d'occupation (Figure 23), ce qui permet de reconstituer un C-Facteur au cours du temps. Le calcul du C-Facteur se fait de la manière suivante :

$$C_{\text{Facteur}} = C_{C3} \times A_{C3} + C_{C4} \times A_{C4} + C_{\text{paturage}} \times A_{\text{paturage}} + C_{\text{foret}} \times A_{\text{foret}} + C_{\text{urbain}} \times A_{\text{urbain}}$$

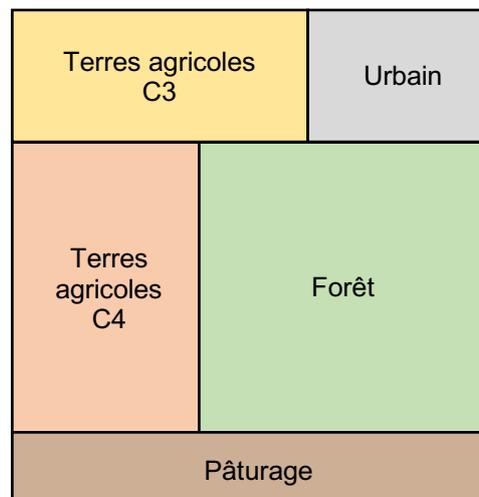


Figure 23 : représentation de la répartition spatiale des différents types d'occupation des sols.

Source : Valentine Sollier

Les différentes utilisations des sols influencent l'ampleur de l'érosion des sols de façon plus ou moins significative, d'où l'importance d'associer à chaque type d'utilisation des sols une valeur de C-Facteur plus ou moins grande. L'ensemble des catégories d'occupation des sols décrit dans LUH2 est renseigné ci-dessous (Figure 24) avec la valeur du C-Facteur correspondant issue de la littérature.

Nom des variables LUH2	Valeur du C-factor (Panagos et al., 2015)	Nom de la variable dans l'article de Panagos
primf forested primary land	0.0001	forest
primn non-forested primary land	0.01	natural grassland
secdf potentially forested secondary land	0.03	agro-forestry
secdn potentially non-forested secondary land	0.01	moors and heathland
pastr managed pasture	0.15	pastures (maximum)
range	0.05	pastures (minimum)
c3ann / c3per / c3nfx c3 annual / perennial / nitrogen-fixed crops	0.15	rice
c4ann / c4per c4 annual / perennial crops	0.38	maize
urban	0	urban / no land use

Figure 24 : valeur du C-Facteur associé à chaque type d'occupation du sol

Source : Valentine Sollier

Le temps de calcul étant important sur des objets comme les rasters, cette contrainte nous mène à sélectionner un pas de calcul de l'érosion de 10 ans sur l'ensemble de notre période temporelle (1850-2100) pour cette étude.

L'étape de corroboration du modèle RUSLE contraint avec les données de LUH2 s'effectue en étudiant la force de relation et de significativité entre les valeurs du CEMAGREF-EDF et celles obtenues dans cette étude avec le modèle RUSLE adapté au long-terme et contraint avec LUH2. Cette corroboration est réalisée sur une année de la période récente car EDF ne dispose pas à ce jour de données temporelles de l'érosion pour la grande majorité de ses sites. En revanche, EDF possède une valeur d'érosion pour l'année 2006. Cette étape de corroboration permet de comparer les valeurs obtenues avec le modèle RUSLE ayant le C-Facteur en temporel avec des valeurs d'érosion de référence qui sont considérées comme juste spatialement. L'idée est donc de confronter le modèle RUSLE-LUH2 avec le modèle de EDF pour contrôler si l'approche fonctionne. Cette corroboration est l'étape qui justifie et permet de faire varier temporellement le modèle et d'utiliser ce modèle contraint avec LUH2 sur les bassins versants des lacs naturels et artificiels.

Pour montrer les tendances temporelles sur les bassins versants, HydroSHEDS est la base de données utilisée. Nous avons récupéré les bassins versants HydroSHEDS qui contiennent des plans d'eau. Pour cela, nous avons récupéré les plans d'eau issus de HydroLAKES où une distinction entre lacs naturels et artificiels (réservoirs) est établie. Cette catégorisation des plans d'eau est indispensable pour représenter l'érosion autour des lacs naturels et des réservoirs.

2. Utilisation du modèle RUSLE contraint avec les données d'occupation des sols

2.1. Choix de la base de données LUH2

Le choix de la base de données utilisée s'explique par plusieurs idées. Tout d'abord, la base de données LUH2 couvre l'ensemble de la période temporelle de notre étude : passée (de 1850 à 2015) et future (2016-2100). LUH2 offre donc des données d'occupation des sols qui sont estimées en fonction des différents scénarios futurs. Cet aspect est un premier point fort de cette base de données. En effet, il n'en va pas de même pour les autres bases de données qui ne couvrent donc pas l'ensemble de la période temporelle. Ainsi, il aurait été bien plus compliqué de prendre deux bases de données différentes pour le passé et pour le futur et de joindre les deux périodes. Cette idée s'explique par le fait que quantitativement les deux bases de données n'auraient pas forcément été comparables.

De plus, la base de données LUH2 renseigne plusieurs catégories d'occupation des sols, contrairement à d'autres bases de données, ce qui permet d'établir une distinction entre différents types de terres cultivées par exemple, afin d'affiner la valeur du C-Facteur.

Aussi, nous savons que LUH2 est une agrégation spatiale de HYDE. Une étude (Mazure et al, submitted) utilisant la même méthodologie avec HYDE montre que cette base de données permet de représenter des flux d'érosion à long terme avec RUSLE. Cette agrégation est validée puisque les ordres de grandeur d'érosion obtenus avec LUH2 sont similaires avec HYDE sur le long terme à l'échelle de la France. Cette validation par une autre étude, présente LUH2 comme une base de données potentiellement intéressante pour notre étude.

De plus, la résolution temporelle et la résolution spatiale reste correcte, et cette base de données fait l'objet de comparaison avec d'autres bases, ce qui permet d'avoir un regard critique (Figure 25).

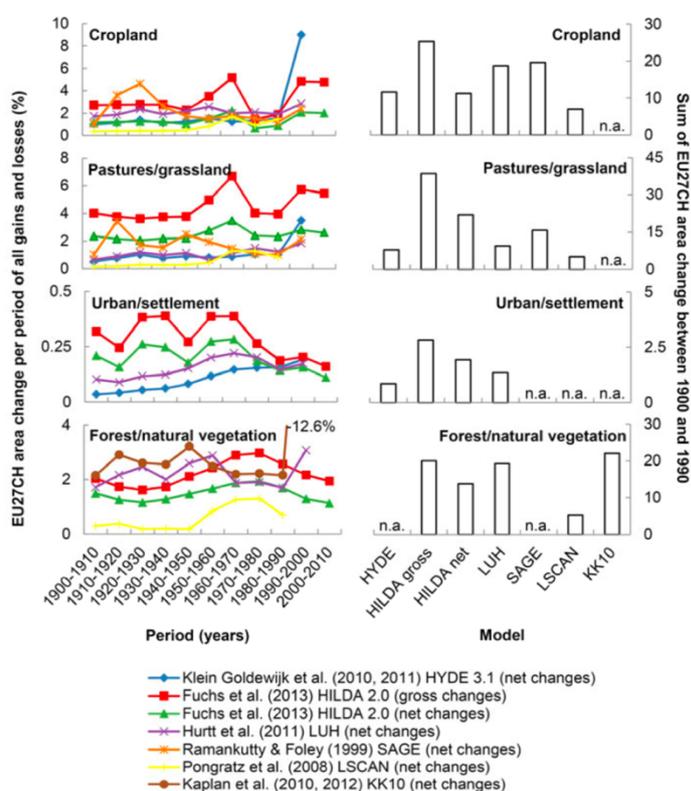


Figure 25 : Comparaison des bases de données d'occupation des sols

Source : Fuchs et al., 2014

En ce qui concerne les scénarios futurs utilisés dans cette étude, nous nous appuyons sur l'ensemble des scénarios définis par le GIEC (Figure 26 et 27), qui ont été établis à partir de deux dimensions : l'ampleur du changement climatique et des différentes conditions socio-économiques futures qu'il est possible d'envisager (Popp et al. 2017). Ainsi, ces deux aspects complémentaires se matérialisent par les RCP qui font référence aux différentes trajectoires de concentration représentatives qui correspondent à l'ampleur du changement climatique futur (Van Vuuren et al., 2011) et les SSP, les Shared Socio-economic Pathways, qui décrivent les conditions socio-économiques futures possibles.

Les SSPs peuvent être combinées avec les RCPs dans une « architecture de matrice de scénarios » (Van Vuuren et al., 2016) (Figure 27). Les SSP présentent cinq scénarios futurs différents de développement socio-économique, en détaillant les tendances possibles en matière d'utilisation des terres (O'Neill et al.).

SSP	SCENARIOS	LAND USE CHANGE REGULATION	LAND BASED CLIMATE CHANGE MITIGATION
1	Sustainability Taking the green road	Strong regulation to avoid environmental tradeoffs	No delay in international cooperation with full participation of the land-use sector
2	Middle-of-the-Road	Medium regulation : slow decline of deforestation	Delayed international cooperation with partial participation of the land-use sector
3	Regional Rivalry A rocky road	Limited regulation : continued deforestation	Heavily delayed international cooperation with limited participation of the land-use sector
4	Inequality A road divided	High regulation in developed countries	No delay in international cooperation with partial participation of the land-use sector
5	Fossil-fueled development Taking the highway	Medium regulation : slow decline in the rate of deforestation	Delayed international cooperation with full participation of the land-use sector

Figure 26 : Scenarios SSP - Shared socio-economic pathways scenarios

Source : Popp et al., 2017

SSP	IAM	RCP	Land use
1	IMAGE	1.9	Bioenergy use, carbon capture and storage policies with reduction of deforestation
		2.6	Reduction in total agricultural land in favour of afforestation and bioenergy production
2	MESSAGE	4.5	Current deforestation rate until 2050, afforestation after 2050
3	AIM	7	Large-scale deforestation by cropland and pasture expansion
4	GCAM	3.4	Large increase in total cropland area in favour of bioenergy production in developed countries
		6.0	Modest expansion of global crop and pasture land, global increase of forest cover
5	REMIND - MAgPIE	3.4 OS	Mass pasture conversion to cropland and large-scale deployment of second-generation bioenergy crops after 2040
		8.5	Mass pasture and forest conversion to cropland

Figure 27 : LUH2 land-use scenarios

Source : Hurtt et al., 2020

Pour cette étude, nous avons choisi les scénarios SSP1 – RCP 2.6, SSP2 – RCP 4.5, SSP3 – RCP 7, SSP 5 – RCP 8.5 par conformisme par rapport aux autres études réalisées sur le sujet (Borrelli et al., 2020). Ce choix permet de représenter un scénario optimiste (SSP1 – RCP 2.6), un autre pessimiste (SSP 5 – RCP 8.5) et deux scénarios entre les deux les plus extrêmes, avec l'un qui conserve les tendances actuelles optimistes (SSP2 – RCP 4.5) et un autre qui conserve les tendances actuelles pessimistes (SSP3 – RCP 7).

2.2 Représenter l'érosion des sols autour des plans d'eau français

L'application du modèle RUSLE-LUH2 est réalisée sur les bassins versants des plans d'eau français en distinguant lacs naturels et lacs artificiels. Pour cela la base de données utilisée est HydroSHEDS. Cette base de données présente les bassins versants dans le monde sur la couche HydroBASSINS à des échelles différentes. Le choix de la résolution spatiale la plus fine au sein de la base de données HydroSHEDS s'explique par une observation de beaucoup de petits lacs en France ce qui justifie l'idée de prendre des sous bassins versants qui seront davantage représentatifs. Dans cette étude, les bassins versants utilisés, ne correspondent donc pas aux bassins versants de tous les plans d'eau en France mais à tous les sous bassins versants hydrographiques d'une zone donnée dans laquelle peut être contenue plusieurs lacs. (Figure 28) Une des conséquences est que nous n'aurons pas une idée de l'érosion dans un lac donné mais une idée de l'érosion dans une zone où il y a tel type de plans d'eau. Une approximation régionale sera alors réalisée. Même si l'utilisation des réels bassins versants de chaque lac pourrait être davantage représentative, en prenant en compte la résolution spatiale de LUH2, l'analyse à l'échelle du bassin versant de chaque lac ne serait pas réalisable puisque les bassins versants sont trop petits par rapport à la taille de la maille de LUH2, ce qui reviendrait à estimer une érosion régionale, donc ces sous bassins versants sont plutôt bien adaptés pour LUH2. De plus aujourd'hui il n'existe pas de base de données correspondant aux bassins versants de chaque lac.

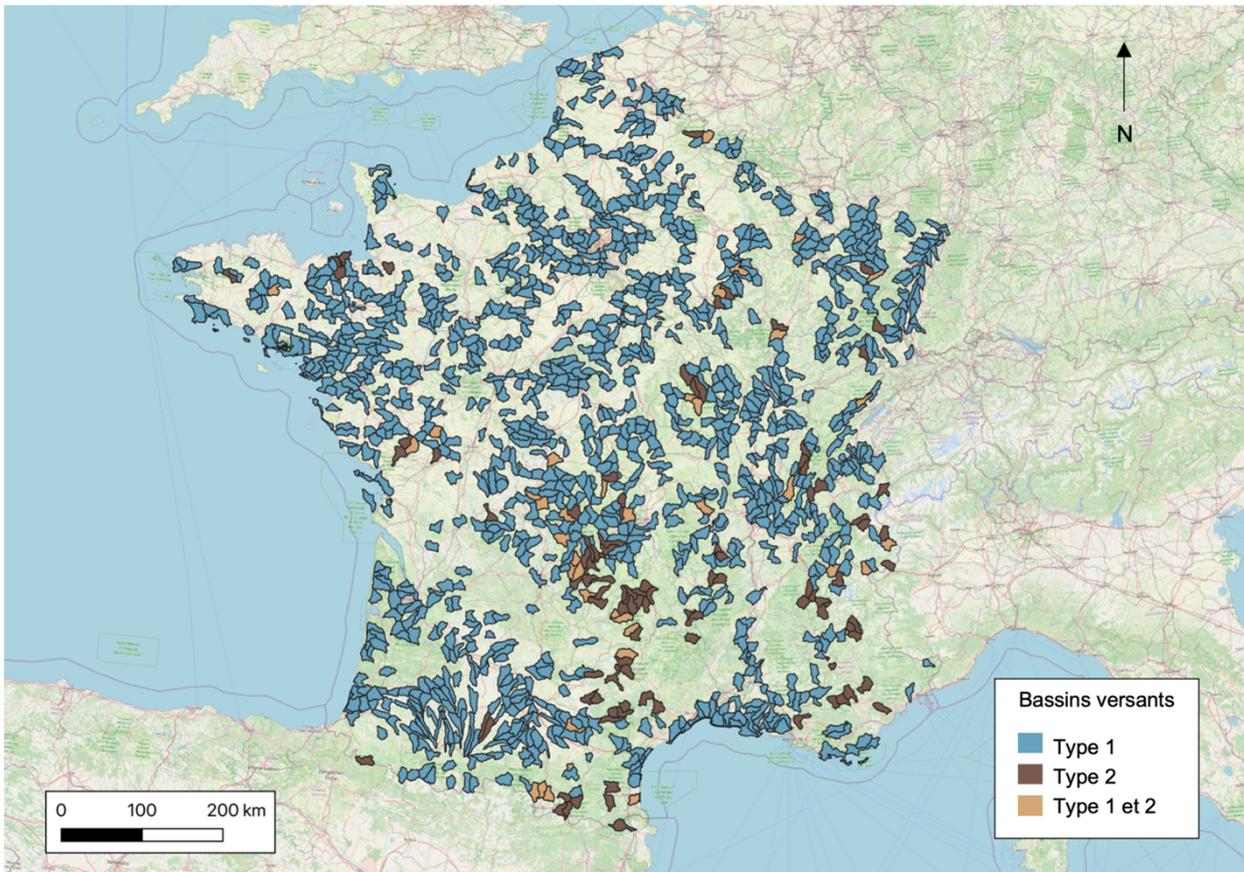


Figure 28 : sous bassins versants hydrographiques HydroSHEDS
Source : Valentine Sollier

S'il est possible d'observer quelque sous bassins versants regroupant les deux types de plans d'eau, il est également possible de souligner qu'une des forces de cette étude est de présenter un grand nombre de sites. Ainsi, la majorité des sites étudiés correspondent à un seul type de plan d'eau. Ce nombre de sites importants permet dès lors de pouvoir tirer des conclusions sur l'érosion autour des différents types de plans d'eau. Les bassins versants (Figure 28) en bleu font référence à des bassins versants de lacs naturels (type 1), en marron foncé les bassins versants correspondant aux réservoirs (type 2) et en marron clair des bassins versants où se trouvent les deux types de plans d'eau.

RÉSULTATS

1. Validation de la méthode d'estimation de l'érosion

L'étape de validation de la méthode relève d'une estimation du niveau de corroboration des valeurs d'érosion obtenues simulées à l'aide de notre modèle RUSLE révisé dans cette étude et contraint avec les données d'occupation des sols LUH2 et les valeurs estimées par le CEMAGREF-EDF pour la même année et sur les mêmes bassins versants recensés par EDF.

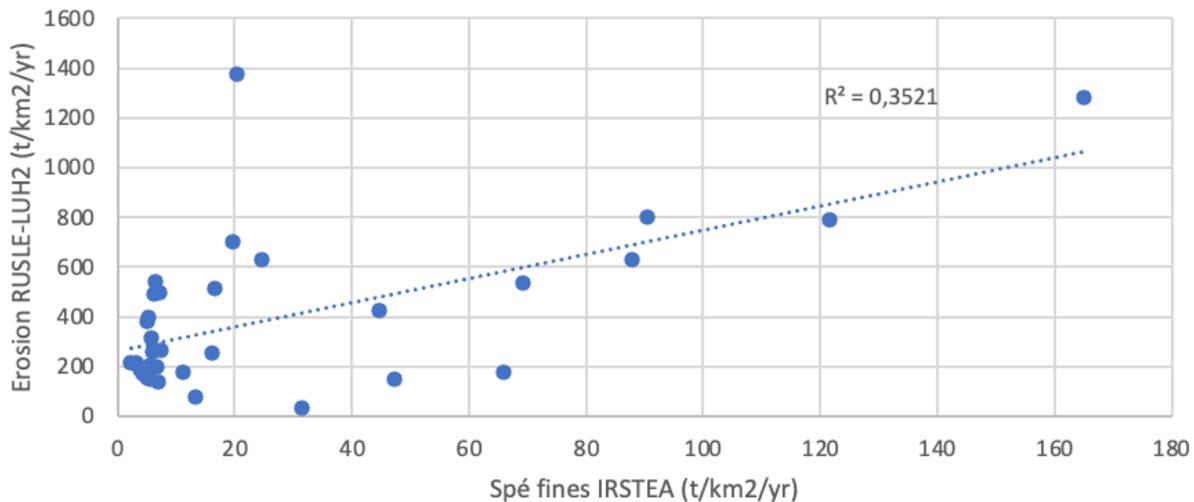


Figure 29 : Corrélation RUSLE-LUH2 et IRSTEA pour les grands bassins versants EDF pour 2006

Source : Théo Mazure

La plutôt faible valeur du R^2 : 0.35, (Figure 29) indique qu'il existe une corrélation de seulement 35% entre les valeurs obtenues avec les deux modèles. Ce R^2 dépend de plusieurs paramètres : de la maille de la base de données utilisée (celle de LUH2 est assez grande 25km), des C-Facteur, et de la résolution temporelle. Cette valeur du R^2 ne permet pas d'analyser les valeurs absolues directement obtenues par la suite pour les chroniques temporelles. Cependant les tendances obtenues pourront être analysées.

De plus, il est possible d'ajouter que EDF cherche grâce à ses études à analyser le comblement des barrages. Cet aspect précisément les intéresse pour avoir un regard critique sur le fonctionnement de leurs infrastructures. De ce fait, ce qui intéresse davantage EDF est de connaître la part et la quantité de sédiments érodés qui vont être transférés d'amont en aval vers la retenue d'eau où se trouve un aménagement EDF. En ce sens, ce qui est calculé dans notre étude est différent. Notre objectif cherche à montrer à quel point le sol va être déstocké de ses sédiments, dans sa totalité sans se focaliser sur le transfert : c'est-à-dire sur la part du sol érodé qui arrive dans les plans d'eau. En effet, cela évite de prendre en compte et de faire varier des paramètres incertains sur le long terme car le transfert varie beaucoup au cours du temps, en lien avec les installations et les aménagements sur les réseaux hydrographiques. Donc, nous pouvons dire que même si les deux approches (celle d'EDF et la nôtre) sont liées, les deux modèles ne calculent pas tout à fait la même chose, puisque EDF prend en compte seulement le transfert. Cette différence amène des incertitudes sur la

corrélation. Néanmoins, les valeurs obtenues pourront être comparées relativement entre les lacs naturels et artificiels. De plus, les valeurs quantitatives obtenues par notre approche RUSLE sont en moyenne du même ordre de grandeur que d'autres approches (Panagos et al., 2015 ; Mazure et al., submitted). Ainsi, les résultats de ces travaux sont interprétables quantitativement aux incertitudes précitées.

2. Chroniques temporelles d'érosion des sols autour des lacs naturels et des réservoirs

Les deux chroniques temporelles (Figure 30 et 31) représentent les tendances d'évolution de l'érosion des sols passées et futures avec les différents scénarios SSP-RCP.

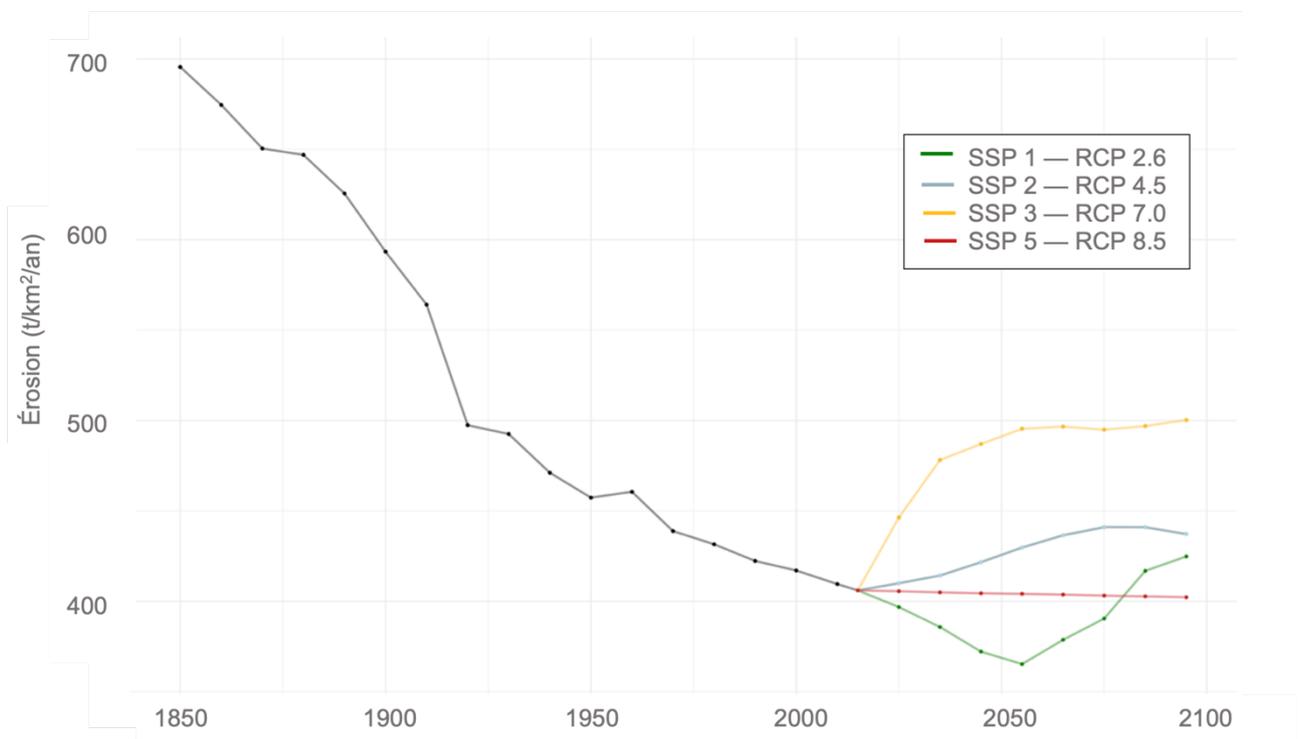


Figure 30 : Évolution de l'érosion des sols autour des réservoirs avec le modèle RUSLE contraint avec les données d'LUH2 en forçage temporel sur la période 1850-2100

Source : Valentine Sollier

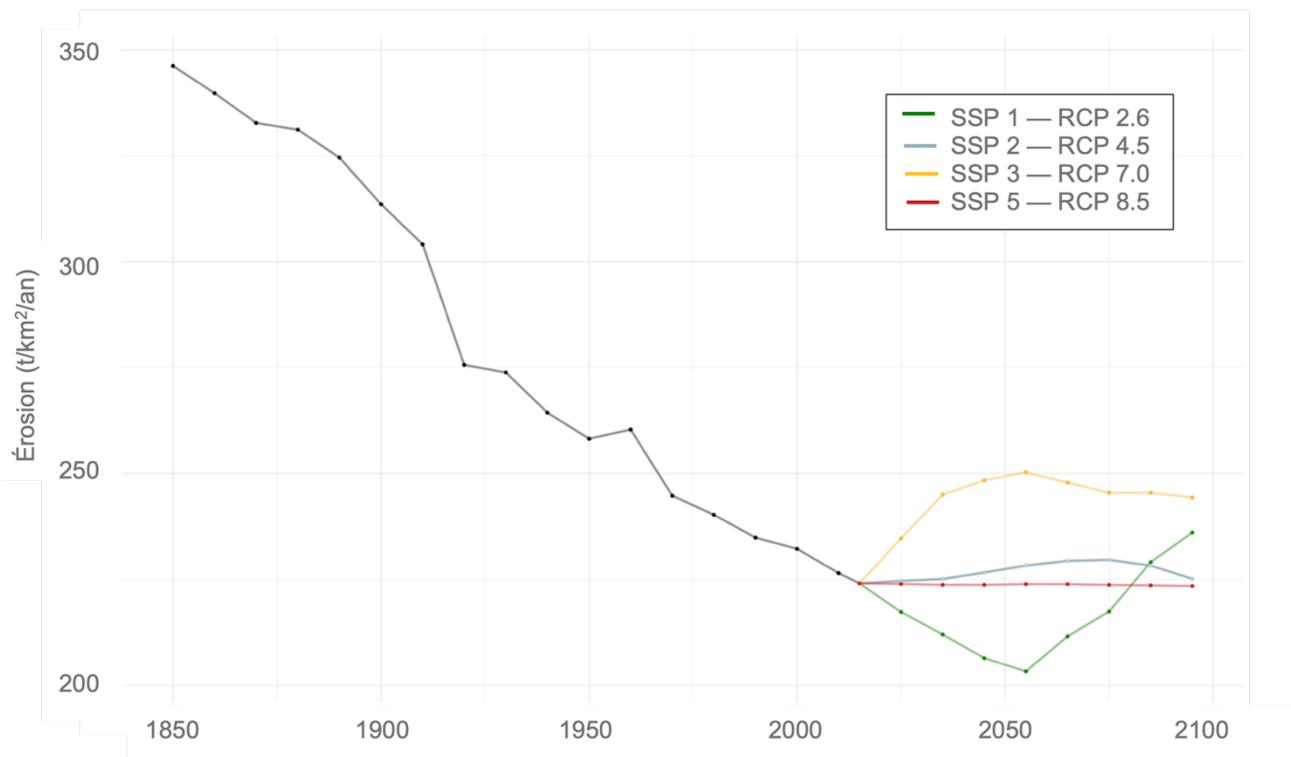


Figure 31 : Évolution de l'érosion des sols autour des lacs naturels avec le modèle RUSLE contraint avec les données d'LUH2 en forçage temporel sur la période 1850-2100

Source : Valentine Sollier

Dès lors, l'interprétation des dynamiques et des tendances d'érosion est possible. Si nous pouvons dire que les tendances sont similaires entre les lacs naturels et artificiels, nous pouvons également souligner la différence de sensibilité à l'érosion entre les réservoirs et les lacs naturels. En effet, même si les valeurs obtenues d'érosion ne sont pas directement exploitables en valeur absolue compte tenu de la faible valeur du R^2 obtenue mais également du choix du facteur de forçage temporel, ces quantités peuvent être comparées entre elles de manière relative. En portant un regard critique sur le choix du facteur de forçage du modèle, même si l'importance du C-Facteur sur l'influence de l'érosion est largement démontrée dans la littérature, nous pouvons également mettre en évidence la potentielle importance d'un autre facteur à ces échelles de temps : le R-Facteur. Si la végétation reste un facteur de forçage essentiel pouvant limiter l'influence de la pluviométrie sur l'érosion, dans un contexte où les événements extrêmes se multiplient comme des pluies violentes ou les inondations, le R-Facteur devient également important. Ainsi, le choix du facteur temporel nous oblige à porter un regard critique sur les valeurs obtenues. Ainsi, les valeurs d'érosion des sols présentées pour les réservoirs sont sensiblement plus élevées que pour celles des lacs naturels. Les valeurs d'érosion présentées pour les réservoirs sont deux fois supérieures à celles des lacs naturels, indiquant une érosion plus importante autour des réservoirs qu'autour des lacs naturels. Cependant, il faut noter que ces résultats représentent surtout les tendances d'évolution de l'érosion autour des deux types de plans d'eau étudiés au cours du temps selon des caractéristiques environnementales régionales, et moins l'évolution de l'érosion spécifique à chaque site car certains réservoirs ont été implantés sur le territoire français après 1850.

Pour la période passée, la diminution de l'érosion autour des plans d'eau, quelque soit le type, correspond bien aux tendances de reboisement et de revégétalisation du territoire national modélisées de manière générale.

En ce qui concerne les scénarios futurs, pour les prédictions les plus optimistes représentées par le scénario SSP1-RCP2.6, il est possible d'observer une nette diminution de l'érosion liée à une reforestation jusqu'en 2050, mais une importante augmentation des tendances érosives est visible, dépassant d'autres scénarios catégorisés comme davantage pessimistes. Cette observation est liée à une augmentation des surfaces des terres cultivables après 2050 (Figure 32) et notamment des cultures classées C4 ayant la valeur de C-Facteur la plus élevée parmi les différentes occupations des sols engendrant une ré-augmentation de l'érosion. Ainsi, malgré une reforestation qui peut entraîner une diminution du taux d'érosion, ce dernier peut ré-augmenter selon les pratiques agricoles qui peuvent inverser la tendance.

Le scénario défini comme étant le plus pessimiste (SSP5 RCP8.5) par le GIEC pour les émissions de gaz à effet de serre, se révèle bien moins pessimiste en ce qui concerne l'érosion des sols. En effet, la progression lente de la conversion des terres en terres cultivable, qui tend à diminuer en 2100, à laquelle s'ajoute une tendance d'augmentation du couvert forestier (Figure 32) engendre des taux d'érosion assez stables. Ainsi, le scénario classé comme étant le plus pessimiste ne l'est pas pour les flux l'érosion des sols et par conséquent pour une partie des flux de carbone.

Le scénario SSP3 RCP 4.5 présente les prédictions les plus pessimistes en ce qui concerne l'érosion. En effet, une augmentation rapide des terres cultivées et des pâturages au détriment des surfaces forestières a pour conséquence une nette augmentation de l'érosion. Une légère ré-augmentation du couvert forestier après 2050 engendre une diminution de l'érosion autour des lacs naturels, mais cette observation n'est pas visible autour des réservoirs.

Pour le scénario SSP2-RCP4.5, le même pattern est observé entre l'érosion autour des lacs naturels et des réservoirs. En effet, les surfaces dédiées aux terres cultivables augmentent de manière continue jusqu'en 2100, et l'expansion du couvert forestier au profit des pâturages après 2050 engendre une diminution de l'érosion qui est bien plus marquée autour des lacs naturels que des réservoirs

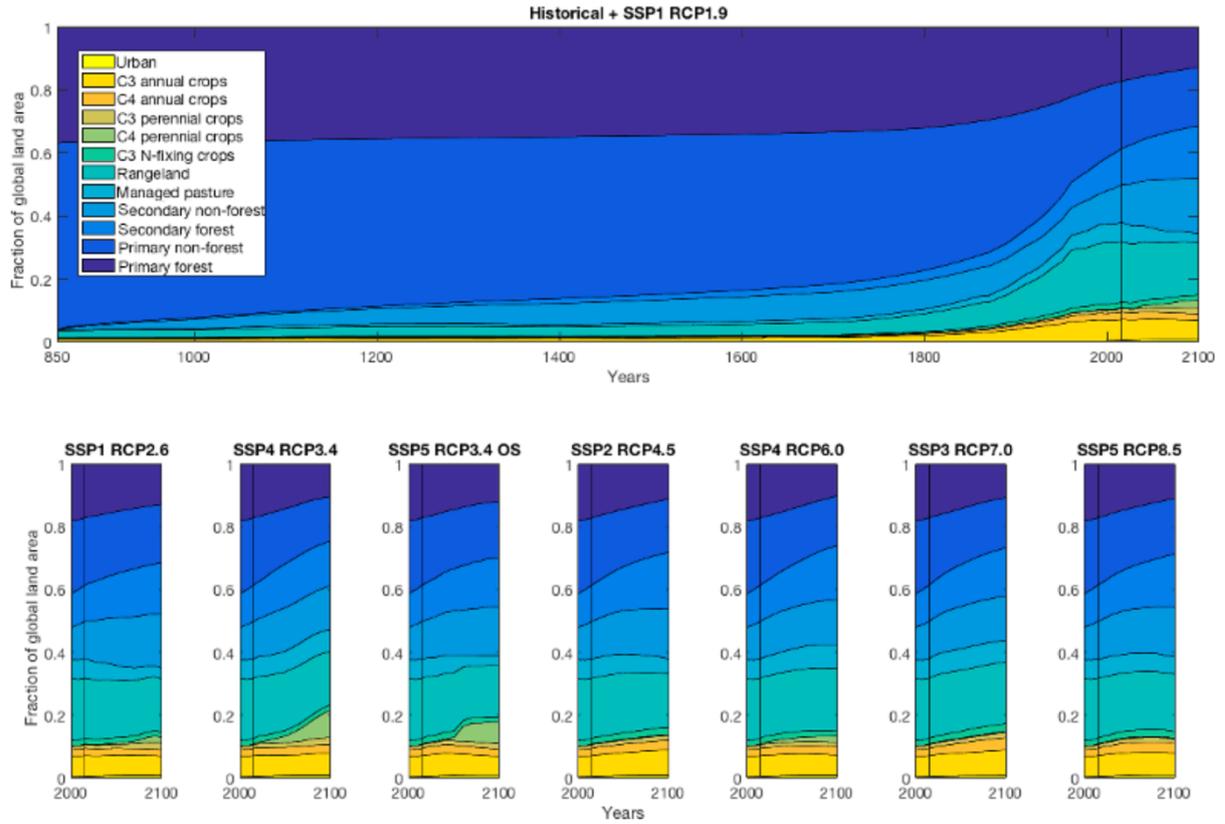


Figure 32 : Fractions harmonisées de la surface mondiale d'utilisation des terres 850-2015 (base historique) et 2015-2100 pour les huit scénarios futurs du RCP selon LUH2

Source : Hurtt et al., 2020

DISCUSSION GÉNÉRALE

1. Discussion sur l'approche de l'étude

Notre approche présente l'avantage d'étudier les flux d'érosion sur une large échelle temporelle présentant les estimations de flux d'érosion passée et les prédictions des flux d'érosion futures en fonction des différents scénarios définis par le GIEC. Peu d'études se sont attachées à représenter les flux d'érosion sur une longue période de temps, et en ce sens notre approche présente l'avantage de se présenter comme une tentative de développer une méthode et de fournir des tendances temporelles afin de mieux comprendre les changements en cours et appréhender le devenir des flux via les scénarios futurs. Les analyses préalables et la méthodologie mise en place, en adoptant comme facteur de forçage temporel l'occupation de sols exprime la tentative de mettre au point une méthode qui est représentative de notre zone d'étude aussi bien dans le temps que dans l'espace.

De plus, le modèle utilisé dans notre étude, RUSLE, est le modèle le plus utilisé pour l'étude de l'érosion des sols, les applications de ce modèle sont multiples et à des échelles différentes à l'échelle du bassin versant en passant par l'échelle nationale et européenne. De plus ce modèle présente un avantage considérable, étant simple d'utilisation il se présente comme un outil pratique, simple à comprendre pour les gestionnaires mais également pour les scientifiques pour obtenir des tendances temporelles et faire varier dans le temps des facteurs de forçages.

S'ajoute l'idée que notre zone d'étude est largement connue et a fait l'objet de plusieurs études. Ainsi, des taux d'érosion, au moins sur la période récente, sont publiés et peuvent être un point de comparaison pour juger l'ordre de grandeur des valeurs que nous avons obtenues avec celles déjà vérifiées et qui font consensus dans la littérature.

Cette approche présente des incertitudes multidimensionnelles. La première forme d'incertitude concerne le modèle utilisé, c'est-à-dire les incertitudes qui sont intrinsèquement liées au modèle RUSLE lui-même. En effet, la littérature fait référence à cet aspect. La question de la validation du modèle est évoquée par Borrelli et al., (2021) et indique que « the most frequently used validation/evaluation method is the comparison of the modelling estimates against the measured sediment yield (SY) values ». Borrelli et al. (2021) indique que les applications des modèles USLE et RUSLE affichent des valeurs de validation/évaluation raisonnablement élevées (63 à 69 %) lorsqu'elles sont appliquées pour simuler les rendements de sédiments.

Un autre aspect est source d'incertitude et influence grandement les valeurs d'érosion en sortie du modèle. Le C-Facteur étant un paramètre très sensible, il engendre des incertitudes non négligeables. Le choix des valeurs des C-Facteurs a fait l'objet de recherche approfondies. Initialement, nous avons attribué le même C-Facteur à l'ensemble des cultures C3 et C4, ainsi qu'à l'ensemble des zones de pâturage, sans faire de distinction plus fine et plus précise entre les différents types. Lorsque nous avons augmenté le nombre de classe de C-Facteur en établissant une distinction entre les différents types de cultures et de pâturages, les valeurs des flux d'érosion affichées par le modèle d'érosion ont sensiblement été affectées par ce changement. Ainsi, le choix des valeurs du C-Facteur pour calibrer le modèle affecte de manière importante les taux d'érosion en sortie, notamment les valeurs élevées comme celles affectées pour les cultures C4 dans un contexte français où l'agriculture est prépondérante. En effet, la valeur du C-Facteur associée à la catégorie correspondant

à la forêt secondaire a également fait l'objet de plusieurs tests. La valeur affectée de 0.03 et correspondant à la catégorie agroforesterie dans la littérature (Panagos et al. 2015) jugée élevée, a été par la suite remplacée par la valeur de 0.003 correspondant à la catégorie forêt de transition-arbuste. La description indiquant que cette catégorie représente soit la dégradation des terres boisées, soit la forêt faisant référence à la régénération du couvert forestier qui recolonise l'espace, correspond davantage à de la forêt secondaire. Ce changement a permis de constater que les résultats des valeurs d'érosion ont été revues à la baisse, à la suite de ce changement de valeur. Nous avons donc testé plusieurs C-Facteur pour l'ensemble des catégories afin de calibrer au mieux le modèle.

Le choix d'une base de données est également source d'incertitude. LUH2 présente un certain nombre d'avantages mais qui n'est pas sans inconvénient. Néanmoins, cette base de données se présente comme étant un plutôt bon compromis concernant notre zone d'étude et notre période de temps longue. Il a déjà été démontré que LUH2 est une agrégation spatiale de HYDE. Or, la méthodologie employée dans notre étude avec LUH2 a déjà été utilisée dans une autre étude avec HYDE qui montre que HYDE permet de représenter des flux d'érosion à long terme avec RUSLE (Mazure et al, submitted), puisque le modèle RUSLE avec HYDE présente des taux d'érosion comparables avec la période récente. Ainsi, les ordres de grandeur obtenus avec LUH2 sur le long terme à l'échelle de la France, sont similaires à ceux obtenus avec HYDE, ce qui justifie le fait que tout en prenant en compte les incertitudes, il peut être réaliste de penser que LUH2 est une base de données intéressante pour contraindre le modèle RUSLE.

Un des inconvénients de la base de données qui peut être mentionné est sa résolution spatiale. En effet, par rapport aux autres bases de données la maille de LUH2 est grande, ce qui influe sur la qualité des résultats. Cette observation témoigne de la nécessité d'avoir des bases de données d'occupation des sols continues sur le temps long à une échelle spatiale plus fine. En effet, la végétation peut avoir des conséquences sur l'érosion de manière très localisée et avec la maille de LUH2 il est possible d'obtenir des valeurs d'érosion moyennée sur une zone.

Le choix des bassins versants utilisés pour l'étude, qui fait référence à l'échelle la plus fine dans HydroSHEDS correspond aux sous bassins versants hydrographiques d'une zone donnée, dans laquelle peut être contenue plusieurs lacs, peut être discuté. Si les bassins versants de tous les plans d'eau étudiés auraient été une échelle plus commode et scientifiquement plus représentative, une observation met en évidence un nombre considérable de petits lacs auxquels sont associés des petits bassins versants, ce qui nous a mené à choisir l'échelle la plus fine parmi ce qu'il y a de disponible dans l'idée d'avoir une échelle la plus représentative possible. De plus la résolution spatiale de LUH2 n'est pas adaptée à l'étude de petits bassins versants. De ce fait, avoir une idée de l'érosion des sols autour de chaque plan d'eau français n'est pas réellement réalisable avec la taille de la maille de LUH2, mais il est possible d'obtenir une idée de l'érosion dans une zone où il y a un type de lacs, revenant à avoir une approximation régionale de l'érosion des sols. Cette échelle de sous bassins versants hydrographiques est dès lors plutôt bien adaptée à LUH2.

2. Discussion sur les résultats

Dans notre méthodologie, la comparaison avec les valeurs obtenues par EDF se présente comme l'étape permettant la corroboration du modèle RUSLE avec LUH2. La corrélation entre les

valeurs obtenues avec le modèle RUSLE-LUH2 et le modèle EDF à l'échelle des grands bassins versants présente un R^2 plutôt faible de 0.35. Plusieurs tests ont été réalisés à diverses échelles spatiales, le meilleur R^2 étant obtenu à l'échelle des grands bassins versants, témoigne que LUH2 est mal adapté à la très fine échelle, car le R^2 obtenu sur les tronçons est plus faible que sur les grands bassins versants. Cependant, il est possible de noter que dans leur méthode, EDF cherche à quantifier les sédiments érodés qui vont être transférés d'amont en aval vers le lac. Les valeurs d'érosion qui sont donc obtenues par EDF correspondent au transfert. Notre méthode calcule, non pas le transfert mais la quantité de sol érodé, sans prendre en compte le transfert, dans l'idée d'éviter de prendre en compte des paramètres incertains car le transfert varie beaucoup au cours du temps à cause des installations sur les réseaux hydrographiques. Donc même si les deux approches sont liées, les deux modèles ne calculent pas exactement la même chose, ce qui influe sur le R^2 et amène des incertitudes sur la corrélation. Cette observation témoigne du besoin d'avoir d'autres valeurs d'érosion sur la période récente pour avoir d'autres données de corroboration.

Si des incertitudes liées à l'approche, et au modèle existent, les ordres de grandeur obtenus pour les flux d'érosion des sols sont comparables à ceux présentés dans la littérature. Si à l'échelle européenne, Panagos et al. (2015) présente des valeurs d'érosion de 320 t/km²/an, les simulations à l'échelle des bassins versants HydroSHEDS utilisées dans notre étude, obtenues avec le modèle RUSLE2015 met en évidence un taux d'érosion de 250 t/km²/an.

La sélection des scénarios s'appuie sur les choix réalisés par les autres études notamment celle de Borrelli et al. (2020). Si le scénario SSP 5 en termes d'émissions de CO₂ présenté comme le plus pessimiste, ne l'est pas lorsque l'analyse est faite en termes d'érosion des sols et donc de transfert latéral de carbone. Dans le cycle du carbone, pour une petite partie des émissions de carbone, qui concerne le déstockage de carbone, le scénario le plus pessimiste n'est pas le SSP5 mais le SSP3 pour lequel les tendances de déforestation sont les plus pessimistes.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude de quantifier les flux d'érosion des sols sur le long terme, pour mettre en perspective l'érosion future par rapport à l'érosion passée, s'inscrit dans l'objectif *in fine* de simuler les exports de carbone dans les plans d'eau en France. En effet, l'érosion a des conséquences majeures sur la dégradation des sols qui passe par son appauvrissement en nutriments. Un de ces nutriments, le carbone initialement stocké et stabilisé dans le sol se retrouve à l'air libre. Si une partie est directement émise sous forme de CO₂, une autre partie est transmise d'amont en aval vers le lac, qui sera stockée dans le plan d'eau, notamment dans les sédiments ou potentiellement émise depuis le lac dans l'atmosphère. Cette émission de CO₂ est potentiellement plus importante dans les lacs de barrage s'expliquant par l'importante variation de la colonne d'eau au cours du temps et de l'année. L'enjeu d'estimer les flux d'érosion depuis les sols, sous-tend dès lors celui des exports potentiels de carbone dans les plans d'eau.

La focalisation sur la couverture du sol, comme facteur de forçage temporel, sur laquelle se construit notre étude s'explique par l'ampleur de l'influence de cette variable sur l'érosion des sols. Ce choix méthodologique nous permet de contraindre le modèle RUSLE avec le C-Facteur afin d'obtenir l'évolution des flux d'érosion des sols autour des plans d'eau français de 1850 à 2100. Les chroniques temporelles obtenues montrent que les réservoirs ont une sensibilité plus élevée à l'érosion que les lacs naturels, indiquant une érosion plus importante autour des réservoirs qu' autour des lacs naturels. Cependant, les incertitudes multidimensionnelles à prendre en compte nous mènent à considérer ces résultats comme permettant surtout de représenter les tendances d'évolution de l'érosion autour des deux types de plans d'eau étudiés au cours du temps selon des caractéristiques environnementales régionales, et moins l'évolution de l'érosion spécifique à chaque site d'autant plus que certains réservoirs ont été implantés sur le territoire français après 1850. Néanmoins, les résultats mettent en évidence, pour la période passée, la diminution constante de l'érosion autour des plans d'eau, quel que soit le type de plan d'eau considéré, ce qui correspond bien aux tendances de reboisement et de revégétalisation du territoire national modélisées de manière générale. Cette remarque est partagée pour les tendances futures puisque les fluctuations des taux d'érosion suivent les tendances de déforestation. Ainsi, pour les scénarios futurs, si le scénario SSP5 en termes d'émissions de CO₂ est présenté par le GIEC comme le plus pessimiste, en termes d'érosion des sols et donc de transfert latéral de carbone l'analyse est différente, en présentant le scénario SSP3 comme le plus pessimiste pour lequel les tendances de déforestation sont les plus importantes.

BIBLIOGRAPHIE

- Bachelard (1942). *L'eau et les Rêves : Essai sur l'imagination de la matière* »
- Blachon (2022). « Atlas Mondial de l'eau – défendre et protéger notre bien commun »
- Borrelli et al. « An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion », 2013
- Borrelli et al. « Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis », 2021
- Bouron (2020). « Erosion » *géoconfluence*.
- Chassé, Barré, Cécillon (2022). « La place des sols dans le cycle du carbone »
- Fuchs et al. (2014). « Gross changes in reconstructions of historic land cover/use for Europe between 1900-2010 »
- Hurt et al. (2020) « Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6 »
- Langlois et Thomas (2016). « Les forêts et leurs arbres, des limiteurs d'érosion »
- Panagos et al. (2015). « The new assessment of soil loss by water erosion in Europe »
- Panagos et al. (2015) « Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale »
- Popp et al. (2016). « Land-use futures in the shared socio-economic pathways »
- Rey et al. (2004). « Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface »
- Rey (2021). « Réparer l'eau »
- Riahi et al. (2016) « The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications : An overview »
- IFREMER - Statfish 2030
URL : <https://starfish2030.ifremer.fr>
- Wigneron, Ciais (2021). « Rôle des forêts dans le bilan de carbone de la planète »