
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Planning sponge landscapes to enhance climate resilience

Entreprise : Leibniz University Hannover, Institute of
Environmental Planning

Adresse : Herrenhaeuser Str. 2 , 30419 Hannover,
Germany

Logo



Tuteur entreprise :
Christian ALBERT
Professeur

Axel KHELADI
IUT
2024-2025

Tuteur académique :
Sabine GREULISH

Table des matières

1. Introduction.....	5
1.1. Présentation de la structure d'accueil	5
1.2. Contexte général et enjeux environnementaux	5
1.3. Pertinence du sujet du stage par rapport aux enjeux environnementaux.....	5
1.4. Présentation du bassin versant de la Lèze	6
1.4. Objectifs du stage.....	6
2. Méthodologie	7
2.1. Construction de la carte du potentiel de base.....	7
2.1.1. La pente.....	7
2.1.2. L'hydromorphie des sols	7
2.1.3. La texture des sols.....	8
2.1.4. Calcul du potentiel de base	11
2.2. Construction de la carte d'occupation des sols (land use)	11
2.3. Construction de la carte de la fonction actuelle (current function)	13
3. Résultats	15
3.1. Carte du potentiel de base de rétention d'eau.....	15
3.1.1. La pente.....	15
3.1.2. Hydromorphie	16
3.1.3. Texture des sols.....	16
3.1.4. Carte de synthèse du potentiel de base	18
3.2. Carte d'occupation des sols	19
3.3. Carte de la fonction actuelle de rétention d'eau	22
4. Discussion	24
4.1. Retour sur les objectifs : ont-ils été atteints ?	24
4.2. Pertinence des méthodes employées	24
4.3. Difficultés rencontrées et choix méthodologiques	24
4.4. Limites de l'étude	25
4.5. Pistes d'amélioration et prolongements possibles	25
4.6. Repositionnement par rapport à la littérature	25
4.7. Leçons tirées.....	26
5. Retour réflexif.....	27
5.1. Une expérience professionnelle et technique enrichissante.....	27
5.2. Un apprentissage international et culturel	27

5.3. Une réflexion critique sur le rôle de l'aménagement	28
6. Conclusion	30
7. Bibliographie.....	31

Table des illustrations

Tableau 1 : Classification des niveau hydromorphiques par rapport à la distance à la nappe phréatique (Source : Albert et al. (2022))	8
Tableau 2 : Tableau des conditions pour calculer le potentiel de base (Source : Gänsrich & Wollenweber, 1995).....	11
Tableau 3 : Tableau des conditions pour calculer la fonction actuelle (Source : Gänsrich & Wollenweber, 1995).....	14

1. Introduction

1.1. Présentation de la structure d'accueil

Ce stage a été réalisé au sein de l'Institut d'Aménagement Environnemental de l'Université Leibniz d'Hanovre. Il s'inscrit dans le projet européen SpongeWorks, un programme de recherche et d'aménagement cofinancé par l'Union européenne dans le cadre d'Horizon Europe. Coordonné par l'institut Deltares et réunissant plusieurs partenaires académiques et territoriaux, ce projet vise à développer, à l'échelle de bassins versants européens, des stratégies dites « éponge » (sponge measures) pour répondre aux aléas hydrométéorologiques (inondations, sécheresses, érosions) tout en améliorant la résilience des territoires face au changement climatique.

L'approche de SpongeWorks repose sur une logique de planification stratégique à l'échelle du bassin versant. Elle consiste à restaurer les fonctions naturelles du paysage afin d'élaborer une vision d'ensemble du territoire à moyen et long terme. Cette vision sert ensuite de référence pour des actions opérationnelles, mises en œuvre à l'échelle des sous-bassins en concertation avec les acteurs locaux (agriculteurs, collectivités, agences de l'eau, etc.), dans une démarche participative garantissant leur adaptabilité et leur acceptabilité.

1.2. Contexte général et enjeux environnementaux

Le changement climatique entraîne une intensification des événements extrêmes, tels que les sécheresses, les crues rapides et les vagues de chaleur, dont la fréquence et la gravité devraient s'accroître dans les prochaines décennies (IPCC, 2022). Parallèlement, l'urbanisation croissante, la canalisation des cours d'eau et la dégradation des sols ont réduit la capacité d'infiltration et de régulation hydrologique des paysages européens (European Environment Agency, 2022).

Dans ce contexte, les mesures « éponge » apparaissent comme une réponse intégrée prometteuse. Elles consistent à ralentir, stocker et redistribuer naturellement l'eau, tout en renforçant la biodiversité, la fertilité des sols et la résilience socio-écologique (SpongeWorks, 2024).

1.3. Pertinence du sujet du stage par rapport aux enjeux environnementaux

Face aux tensions croissantes sur la ressource en eau, évaluer les capacités naturelles de régulation des paysages constitue un levier essentiel pour orienter les politiques d'aménagement vers plus de résilience. Connaître le potentiel d'infiltration, de stockage et de redistribution de l'eau permet d'anticiper les crues, de limiter les sécheresses, mais aussi de réduire les pollutions diffuses, notamment agricoles.

Ce stage s'inscrit dans cette perspective en mobilisant la méthodologie développée par Günsch et Wollenweber (1995), qui distingue deux niveaux d'analyse complémentaires. Le potentiel de base (basic potential) correspond à la capacité naturelle et théorique d'un territoire à retenir l'eau en fonction de ses caractéristiques abiotiques stables, comme la

pente, la texture ou l'hydromorphie des sols. La fonction actuelle (current function) reflète, quant à elle, le niveau réel de rétention, modulé par l'occupation des sols et donc par les usages anthropiques. L'objectif du stage est d'identifier les secteurs où ces fonctions de régulation sont dégradées, et où une restauration écologique pourrait produire un effet significatif.

1.4. Présentation du bassin versant de la Lèze

Le bassin versant de la Lèze est un territoire rural situé au sud de Toulouse, dans le sud-ouest de la France. D'une superficie d'environ 700 km², il s'étend sur les départements de la Haute-Garonne et de l'Ariège. Il est traversé par la rivière Lèze, un affluent de l'Ariège, elle-même affluent de la Garonne. Le bassin est caractérisé par une grande diversité de paysages : zones agricoles en fond de vallée, prairies, forêts sur les versants, et urbanisation diffuse dans les bourgs et villages.

D'un point de vue hydrologique, le bassin présente une forte variabilité saisonnière, marquée par des étiages sévères en été et des crues rapides au printemps et à l'automne. Le climat est de type océanique dégradé à tendance méditerranéenne, avec des précipitations annuelles moyennes comprises entre 700 et 900 mm. L'altitude varie de 200 à plus de 600 mètres, ce qui explique en partie la diversité des sols et des usages. Les principales activités économiques reposent sur l'agriculture (grandes cultures, élevage, maraîchage), mais la pression urbaine liée à la proximité de l'aire toulousaine est de plus en plus marquée.

Ce territoire fait face à plusieurs enjeux environnementaux, en particulier une forte pression sur la ressource en eau, accentuée par les effets du changement climatique. Des problématiques d'érosion des sols, de ruissellement et de pollution diffuse liées aux pratiques agricoles sont également observées. Dans ce contexte, le bassin de la Lèze représente un terrain pertinent pour expérimenter des approches de planification paysagère visant à restaurer les fonctions naturelles du territoire (Syndicat Mixte Interdépartementale de la Vallée de Lèze, s. d.)

1.4. Objectifs du stage

L'objectif principal du stage est de contribuer à l'approche du projet SpongeWorks en produisant une série de cartes thématiques visant à évaluer le fonctionnement hydrologique du bassin de la Lèze. La démarche repose sur une première étape de spatialisation du potentiel de base de rétention à partir des données de pente d'hydromorphie et de texture des sols. Une seconde étape a consisté à générer une carte d'occupation du sol issue des données IGN 2022, adaptée aux catégories de la méthode. Enfin, une table de correspondance a permis de calculer la fonction actuelle de rétention d'eau, définie comme le niveau réellement assuré par le territoire compte tenu de l'usage du sol observé.

Les résultats de ce travail offrent une base opérationnelle pour identifier les zones prioritaires en matière d'aménagement écologique et pour orienter la mise en œuvre de mesures éponge à l'échelle du paysage.

2. Méthodologie

2.1. Construction de la carte du potentiel de base

Pour évaluer la capacité de rétention d'eau (Water Retention Capacity – WRC) du bassin versant de la Lèze, la méthodologie développée par C. Gäsrich et I. Wollenweber (1995) a été mobilisée. Cette approche a été conçue pour la planification paysagère et repose sur la distinction entre des facteurs abiotiques, considérés comme stables à long terme (géologie, sols, morphologie, climat), et des facteurs anthropiques, plus variables car liés aux usages du sol. Elle permet ainsi de différencier le potentiel de base de rétention d'eau et la fonction actuelle de rétention d'eau.

Le calcul du potentiel de base repose sur trois facteurs considérés comme déterminants et relativement stables à l'échelle du bassin : la pente, le niveau piézométrique indiquant l'hydromorphie des sols, et la texture des sols. Chacun de ces paramètres a été évalué à partir de données spatiales, puis intégré dans une grille de classification afin de produire une carte synthétique du potentiel de base.

2.1.1. La pente

La pente constitue un facteur essentiel du potentiel de rétention, car elle influence directement l'infiltration et le ruissellement. Les zones de pente faible favorisent l'infiltration, tandis que les fortes pentes accroissent le ruissellement. Les pentes ont été calculées à partir de la base de données ALTI de l'IGN (BD ALTI® | GéoServices, s. d.) (résolution 25 m, 2022). L'outil *Slope* d'ArcGIS a permis de générer une couche avec les pentes qui ont ensuite été classées en six catégories selon les seuils de la méthode de Gäsrich et Wollenweber (1995).

2.1.2. L'hydromorphie des sols

Le second facteur est le niveau de la nappe phréatique, qui permet de caractériser le degré d'hydromorphie des sols. La logique suivie reprend les travaux de Albert et al. (2022), qui proposent de classer les sols selon trois catégories d'hydromorphie : les sols dits « terrestres » (profondeur de nappe > 1,5 m), les sols semi-hydromorphes (0,8 à 1,5 m) et les sols hydromorphes (< 0,8 m) (Tableau 1). Cette classification traduit directement l'influence de la proximité de la nappe sur la capacité d'infiltration : plus la nappe est proche de la surface, plus l'infiltration est limitée et le ruissellement accentué.

Tableau 1 : Classification des niveau hydromorphiques par rapport à la distance à la nappe phréatique (Source : Albert et al. (2022))

Hydromorphic level	Average groundwater table distance
Terrestic	> 1,5 m
Semihydromorph	0,8-1,5 m
Hydromorph	< 0,8 m

Concrètement, pour appliquer ce principe au bassin de la Lèze, les données issues de l'ADES (portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) ont été exploitées. Les chroniques piézométriques disponibles ont permis de calculer les niveaux moyens et de générer, sous ArcGIS, des courbes d'isopièze à partir des points de mesure. Ces courbes ont servi de base pour interpoler la profondeur de nappe et attribuer une classe hydromorphique aux différentes zones du bassin.

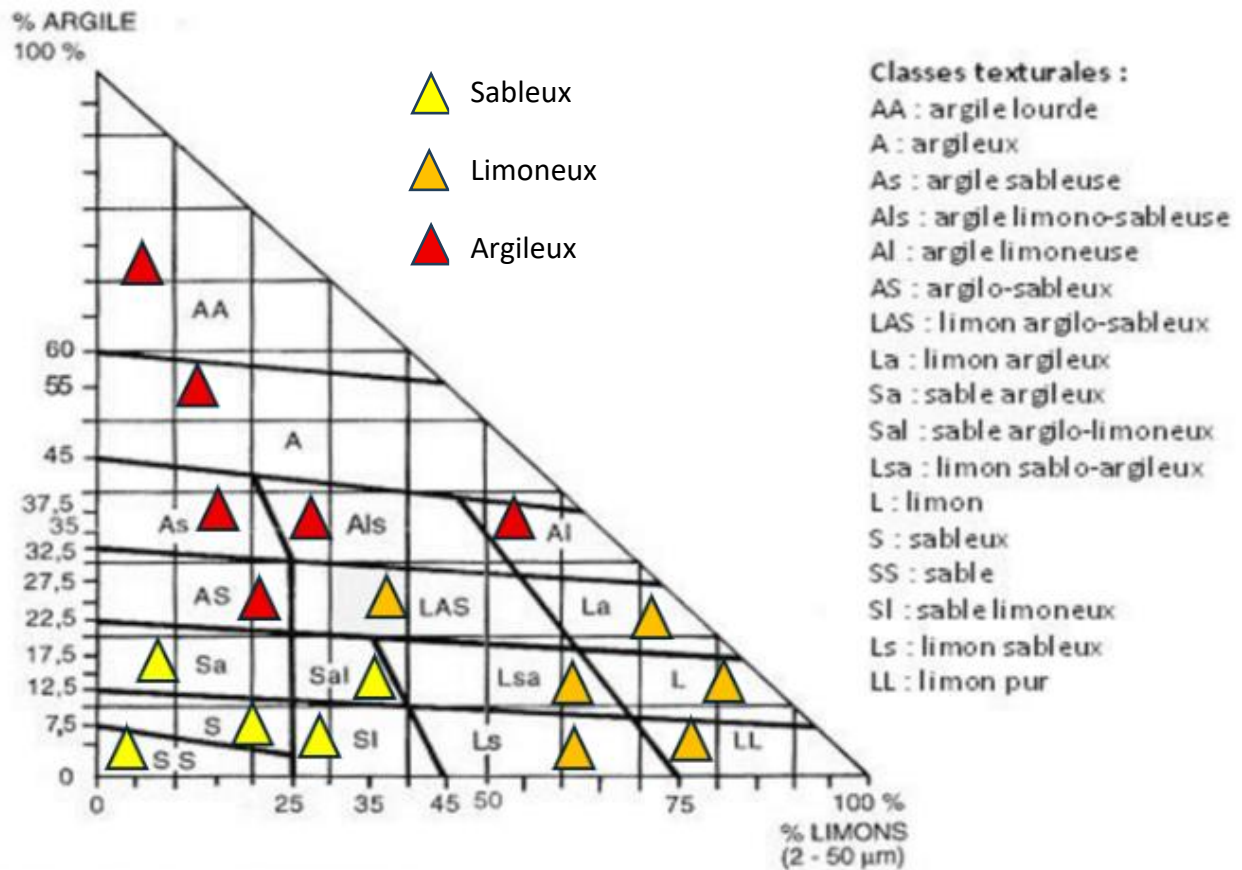
2.1.3. La texture des sols

Le dernier facteur pris en compte est la texture des sols, déterminée par la proportion relative de sable, limon et argile. Une première difficulté est apparue lors de l'utilisation du Référentiel Régional Pédologique (RRP) (Référentiel Régional Pédologique Harmonisé de la Région Occitanie, s. d.). En effet, les classes de sols présentes dans cette base (par exemple fluvisols, luvisols, etc.) ne sont pas définies en fonction de leur texture dominante, mais selon d'autres critères pédologiques (horizons, organisation du profil, genèse). Il n'était donc pas possible d'attribuer directement une texture aux unités pédologiques.

Pour contourner cette limite, il a été nécessaire d'exploiter la base de données complémentaire jointe au RRP, qui fournit pour chaque unité de sol la teneur en argile, sable et limon. Ces données ont d'abord été exportées vers Excel, puis une table des textures a été constituée et jointe à la couche pédologique dans ArcGIS. Cette étape a permis d'associer à chaque unité de sol une composition granulométrique.

À partir de ces teneurs, une catégorisation texturale a été réalisée en se basant sur le triangle de texture du GEPPA (Groupe d'Étude des Problèmes de Pédologie Appliquée). Selon Richer-De-Forges et al. (2008) ce triangle est particulièrement adapté aux sols français, car il a été élaboré à partir de références issues du contexte pédologique national. Les 17 classes texturales initiales ont été regroupées en grandes catégories (sableux, limoneux, argileux) afin de rendre le traitement plus opérationnel pour l'évaluation du potentiel de rétention (Figure 1). Pour cela, la première lettre du nom de chaque classe a été utilisée pour identifier le groupe auquel elle appartient, correspondant au composant dominant :

- le groupe Argile comprend toutes les classes commençant par « A »,
- le groupe Limon comprend toutes les classes commençant par « L »,
- le groupe Sable comprend toutes les classes commençant par « S ».



Triangle du GEPPA (1963)

Source : BAIZE D., 1995. Guide pour la description des sols, INRA Editions.

* GEPPA : Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée

Figure 1 : Triangle de texture du GREPPA avec la classification des textures en 3 classes (Source : Richer-De-Forges et al., 2008)

Afin de simplifier le processus de calcul sur le SIG, des seuils constants ont été définis entre les groupes, c'est-à-dire des seuils perpendiculaires aux axes du diagramme. Cette approximation a conduit à regrouper certains sols dans une famille légèrement différente de leur classification théorique. Par exemple, une partie des sols de type limon sablo-argileux (Lsa) a été intégrée au groupe sableux, bien que cette classe appartienne en réalité à la famille limoneuse. Cette simplification a permis de rendre la classification complexe du triangle textural exploitable dans une couche SIG, tout en préservant sa cohérence méthodologique (Figure 2).

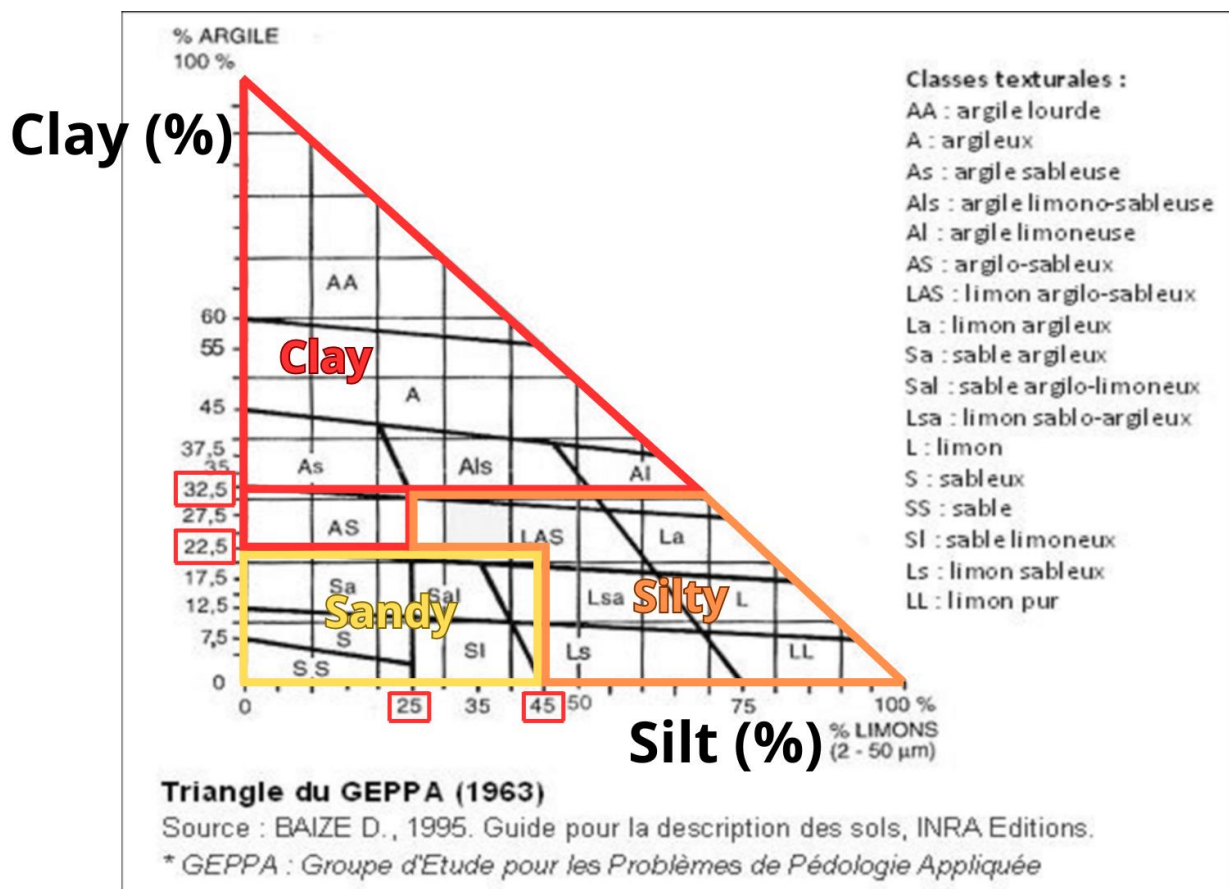


Figure 2 : Triangle de texture du GREPPA avec les seuils des classes de texture (Source : Richer-De-Forges et al., 2008)

2.1.4. Calcul du potentiel de base

Une fois ces trois facteurs déterminés, ils ont été croisés afin d'attribuer à chaque pixel du bassin versant une valeur de potentiel de base, sur une échelle ordinale à cinq niveaux allant de « très faible » à « très élevé ». Cette classification, dérivée du tableau proposé par Gäsrich et Wollenweber (1995), permet de spatialiser les capacités naturelles de rétention d'eau et d'identifier les zones les plus favorables ou défavorables à l'infiltration et au stockage de l'eau. Le croisement a été automatisé grâce à un script Python (Annexe 1), qui applique les règles de correspondance définies par le tableau de classification ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2 : Tableau des conditions pour calculer le potentiel de base (Source : Gäsrich & Wollenweber, 1995)

Characteristic	Hydromorphology class	Terrestrial (ground water table > 1,5m)		
	Soil type	Sandy	Silty	Clay
Slope inclination	0 - 0,5°	Very high	High	Medium
	0,5 – 3°	High	Medium	Medium
	3 – 7°	Medium	Medium	Low
	7 – 12°	Medium	Low	Very low
	12 – 25°	Low	Very low	Very low
	25 – 68,318°	Very low	Very low	Very low

2.2. Construction de la carte d'occupation des sols (land use)

L'objectif de cette étape était de produire une couche unique d'occupation des sols correspondant à une légende harmonisée, la plus proche possible des catégories cibles retenues : « Built-up areas ; Infrastructure ; Mineral extraction site ; Coniferous Forest ; Deciduous Forest ; Mixed Forest ; Croplands ; Greenhouse horticulture ; Permanent grassland ; Temporary grassland ; Heath ; Other wetlands ; Urban greenery and gardens ; Standing waters ». Pour cela, plusieurs bases de données ont été croisées et enrichies, principalement l'Occupation du sol à grande échelle 2022 de l'IGN (OCS GE | GéoServices, s. d.), le Registre

parcellaire graphique (RPG | GéoServices, s. d.) pour les usages agricoles, la cartographie des Zones Humides Effectives (ZHE) issue des inventaires de terrain compilés par le Forum des Marais Atlantiques et financés par l'Agence de l'eau Adour-Garonne (*Zones Humides Effectives Sur le Bassin Adour Garonne*, s. d.), ainsi que les données OSO de l'IGN sur l'artificialisation des sols (Données D'artificialisation Issues de L'OCS GE | Géoservices, s. d.).

Dans un premier temps, la couche OCS GE a été découpée à l'emprise du bassin versant de la Lèze. Un champ a ensuite été créé afin de reclassifier les polygones selon la légende cible. Cette étape consistait principalement à renommer certaines classes existantes de l'OCS GE pour les adapter aux catégories retenues. Par exemple, la classe « Forêts de feuillus » a été renommée en « Deciduous forest » afin de correspondre à la nomenclature de travail. Les formations herbacées, en revanche, n'ont pas été traitées à ce stade, puisqu'elles devaient être précisées ultérieurement à l'aide des données issues du Registre Parcellaire Graphique (RPG) (IGN, 2022).

La couche RPG a été préparée par reprojection et découpage à l'emprise, puis enrichie d'un champ permettant de distinguer les catégories agricoles : « Croplands », « Permanent grassland » et « Temporary grassland ». Ces informations ont été intégrées dans la couche OCS GE en utilisant la combinaison des outils Erase puis Merge, afin de remplacer les polygones existants par ceux issus du RPG et de consolider ensuite les entités. La distinction entre prairies permanentes, prairies temporaires et cultures annuelles a ainsi pu être intégrée.

L'intégration des zones humides s'est faite dans un second temps par croisement de la couche obtenue avec la cartographie des ZHE. Lorsque les polygones de zones humides se superposaient à des entités classées en « Standing waters », cette dernière catégorie a été conservée. Dans les autres cas, les polygones ont été reclassés en « Wetland ». Cette logique a permis de mieux refléter la distribution et la diversité des milieux aquatiques et humides du bassin.

Une autre correction importante concernait la végétation urbaine. Les formations herbacées situées dans des zones artificialisées identifiées grâce aux données OSO/IGN ont été reclassées en « Urban greenery and gardens », ce qui inclut notamment les parcs, talus et autres espaces verts urbains. Cette étape a été réalisée à l'aide de la combinaison des outils Erase puis Merge, suivie d'un calcul conditionnel pour attribuer la nouvelle catégorie.

Un travail de renommage ciblé et d'harmonisation a ensuite été effectué pour s'assurer de la cohérence avec la légende finale. Ces choix de reclassement sont présentés et justifiés dans un tableau en annexe de ce rapport (Annexe 2). Ce tableau synthétise les correspondances entre les catégories de l'OCS GE et les classes de la légende finale. Par exemple, les « Shrub and sub-shrub formations » ont été traduites en « Heath and other dry lands », et certaines zones de sol nu ont été rattachées aux catégories forestières dominantes pour préserver la lisibilité de la carte.

Enfin, un traitement spécifique a concerné les micro-polygones restants, en particulier les formations herbacées de petite taille (< 625 m²). Cette valeur correspond à la surface d'un pixel élémentaire de 25 × 25 m, soit la résolution des couches précédemment construites (pente, texture des sols et hydromorphie). Dans cette logique, on considère qu'une entité

d'une taille inférieure au maillage élémentaire et incluse au sein d'une autre entité n'est pas pertinente et doit être nettoyée. Ces micro-polygones ont donc été isolés et rattachés au polygone voisin dominant grâce à l'outil Spatial Join (option Largest overlap). Leur géométrie a été conservée, mais leur attribut d'occupation du sol a été modifié pour correspondre à celui du polygone environnant. Un champ a ensuite été calculé afin de consolider l'ensemble des attributs. Cette étape a permis de réduire considérablement la fragmentation cartographique et d'améliorer la lisibilité des résultats.

À l'issue de ce processus, la couche finale d'occupation des sols fournit une représentation cohérente et opérationnelle du territoire, adaptée à l'évaluation de la fonction actuelle de rétention d'eau et à l'analyse paysagère du bassin versant de la Lèze.

2.3. Construction de la carte de la fonction actuelle (current function)

L'évaluation de la fonction actuelle constitue une étape essentielle, car elle permet de traduire le potentiel de rétention théorique en une capacité effective, intégrant l'occupation des sols. Autrement dit, elle rend compte de la manière dont les pratiques humaines et les types de couvert végétal modulent les capacités naturelles du bassin versant. Cette approche offre ainsi une vision plus réaliste de la rétention d'eau, en reliant directement les caractéristiques biophysiques du territoire aux usages en place.

La première étape a consisté à créer un identifiant stable pour chaque polygone de la couche d'occupation des sols, afin d'éviter les problèmes liés à l'évolution automatique des champs natifs (comme l'OBJECTID). Cet identifiant a servi de clé de référence pour toutes les jointures ultérieures.

Le potentiel de base, disponible sous forme raster (résolution de 25x25 mètres), a ensuite été croisé avec la couche vectorielle d'occupation des sols. L'outil Zonal Statistics as Table (ArcGIS Spatial Analyst) a été utilisé en définissant les polygones de la couche d'occupation des sols comme zones, le raster du potentiel de base comme données d'entrée, et en sélectionnant l'option Majority pour retenir la valeur majoritaire de potentiel de base par polygone. Pour garantir la cohérence spatiale et limiter les valeurs manquantes, l'outil a produit une table attribuant à chaque polygone la valeur dominante du potentiel de base, ensuite jointe à la couche d'occupation des sols via l'identifiant stable. Cette jointure a été pérennisée par export de la couche enrichie.

Un champ a ensuite été ajouté pour stocker la valeur de fonction actuelle. Celle-ci a été attribuée en appliquant une table de correspondance (figure X), issue de la méthodologie de Günsch et Wollenweber (1995). Cette table croise la classe de potentiel de base (très faible à très élevé) avec la catégorie d'occupation des sols afin d'évaluer dans quelle mesure le potentiel est ou non entravé par l'usage anthropique. Par exemple, les forêts de feuillus ou mixtes obtiennent des valeurs hautes lorsque le potentiel est favorable, tandis que les zones artificialisées, les infrastructures et les zones urbanisées se voient attribuer une valeur systématiquement très faible, quel que soit leur potentiel de base. Cette logique s'appuie sur la distinction entre facteurs abiotiques stables et facteurs anthropiques modulables, au cœur de la méthode développée par les auteurs (Günsch & Wollenweber, 1995).

L'attribution des valeurs de fonction actuelle a été automatisée sur ArcGIS. Ce dernier vérifiait pour chaque polygone la combinaison « potentiel de base × occupation des sols » et assignait la valeur correspondante définie dans le tableau ci-dessous (Tableau 3). L'échelle ordinale retenue va de très faible à très élevé, traduite en valeurs entières (par exemple, très élevé correspond à 5, élevé à 4, etc.) pour faciliter le traitement.

Enfin, des vérifications ont été menées pour contrôler la présence éventuelle de valeurs nulles (zones non couvertes par le raster ou catégories résiduelles). Certaines zones ont été volontairement laissées sans valeur, notamment les formations herbacées (herbaceous formations), qui constituent un nombre très restreint de polygones de petite taille, les plans d'eau permanents (standing waters) et les cours d'eau (La Lèze), car ils ne sont pas inclus dans la méthode d'évaluation de Gänsrich et Wollenweber. Malgré ces exclusions, ces entités résiduelles étant très minoritaires et de petite taille, leur absence de valeur n'affecte pas la cohérence générale des résultats obtenus.

Au terme de ce processus, la carte de la fonction actuelle permet d'évaluer la capacité réelle du bassin versant de la Lèze à retenir l'eau, en intégrant simultanément ses caractéristiques biophysiques et les usages anthropiques.

Tableau 3 : Tableau des conditions pour calculer la fonction actuelle (Source : Gänsrich & Wollenweber, 1995)

		Basic potential				
		Very high	High	Medium	Low	Very low
Land use	Mixed forest, deciduous forest	Very high	Very high	Very high	High	Medium
	Permanent grassland, coniferous forest, Heath and other drylands	Very high	Very high	High	Medium	Low
	Temporary grassland,	High	Medium	Medium	Low	Very low
	Croplands, Urban greenery and gardens	Medium	Low	Low	Low	Very low
	Built-up areas, Infrastructure,	Very low	Very low	Very low	Very low	Very low

3. Résultats

3.1. Carte du potentiel de base de rétention d'eau

L'ensemble des cartes produites est disponible en format agrandi en annexe de ce rapport (Annexe 3). La carte du potentiel de base illustre la capacité intrinsèque du bassin versant de la Lèze à retenir l'eau, en fonction de ses caractéristiques abiotiques. Les résultats mettent en évidence une forte hétérogénéité spatiale.

3.1.1. La pente

Le bassin versant de la Lèze présente de fortes différences de niveaux, avec des pentes pouvant dépasser 60°. Les zones de fond de vallée, marquées par de faibles pentes, favorisent l'infiltration et la rétention d'eau. À l'inverse, les versants abrupts sont synonymes de ruissellement rapide, ce qui limite la capacité de stockage et se traduit par une valeur potentielle plus faible. Sur la carte, les pentes sont classées en 6 classes en fonction du degré d'inclinaison. En tête de bassin versant, certaines pentes vont jusqu'à 68,318° (Figure 3).

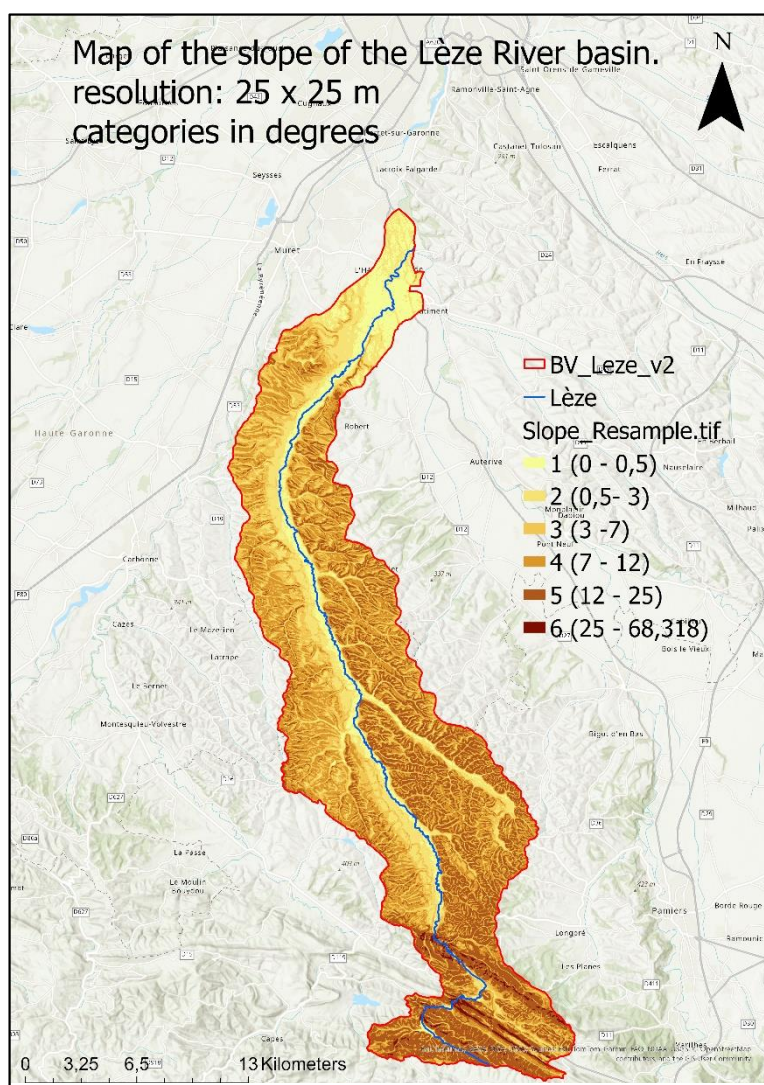


Figure 3 : Carte des pentes du bassin versant de la Lèze

Source : (BD ALTI® | GéoServices, s. d.)

3.1.2. Hydromorphie

Concernant les classes liées à l'hydromorphie des sols, on observe que les nappes phréatiques sont relativement profondes dans la majorité du bassin versant (Figure 4). De ce fait, l'ensemble des sols du bassin versant sont de type « terrestre ». Ce paramètre constitue davantage un invariant qu'un facteur discriminant (Figure 5). La carte produite n'apporte donc pas de contrastes majeurs, mais elle a été nécessaire pour intégrer cette dimension au calcul du potentiel de base. En revanche, les niveaux piézométriques mettent en évidence une certaine diversité locale, avec des variations qui peuvent influencer ponctuellement la capacité de rétention.

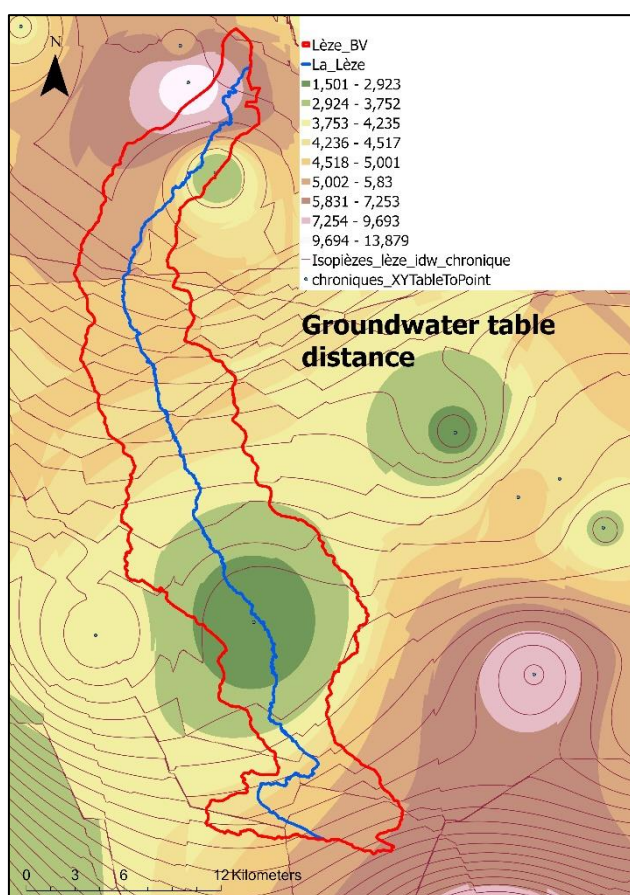


Figure 4 : Carte des distances piézométriques à la nappe phréatique (Source : ADES)

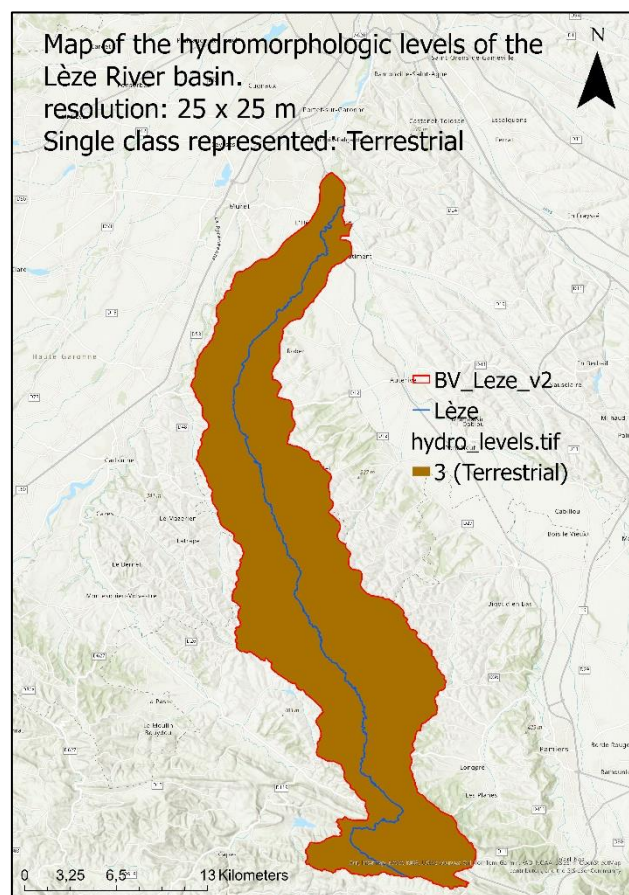


Figure 5 : Carte de la catégorie hydromorphique du bassin versant de la Lèze

3.1.3. Texture des sols

La texture des sols dans le bassin est relativement variée, comme le montre la carte pédologique de référence (Figure 6). On distingue au total huit types de sols différents (par exemple des fluvisols, des luvisols, etc.), qui ont été regroupés en trois grandes catégories : sols sableux, limoneux et argileux (Figure 7). Les sols sableux, localisés principalement sur les versants, présentent un bon potentiel d'infiltration car leur porosité élevée favorise l'infiltration de l'eau. À l'inverse, les sols argileux, visibles en rouge sur la carte et situés sur les

zones les plus pentues du bassin, favorisent le ruissellement de surface et limitent la rétention. Les sols limoneux occupent des positions intermédiaires, souvent à moyenne altitude, et offrent une capacité plus équilibrée. Cette répartition illustre le rôle déterminant de la texture des sols dans les processus hydrologiques, l'infiltration décroissant fortement du sable vers l'argile. (Kuok et al., 2023)

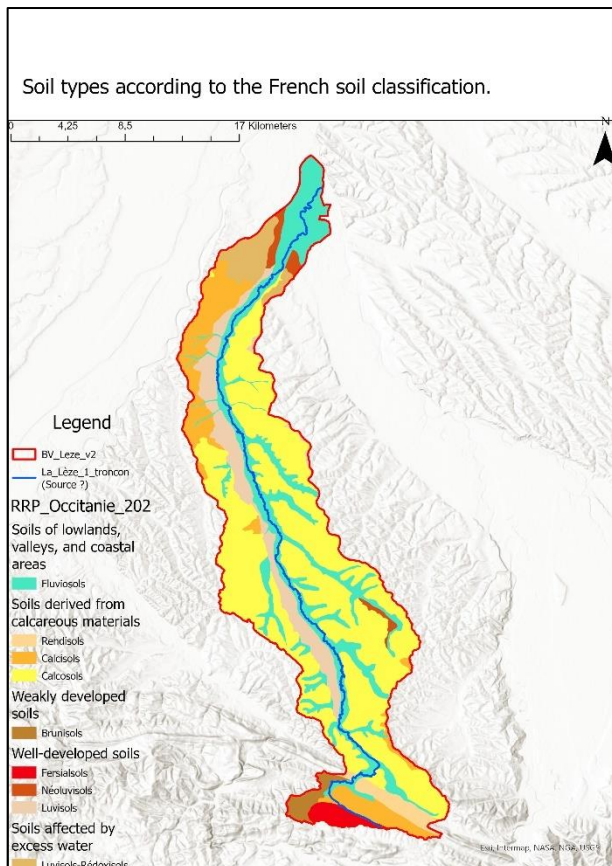


Figure 6 : Carte des types de sols dans le bassin versant de la Lèze (Source : Référentiel régional pédologique harmonisé de la région Occitanie, s. d.)

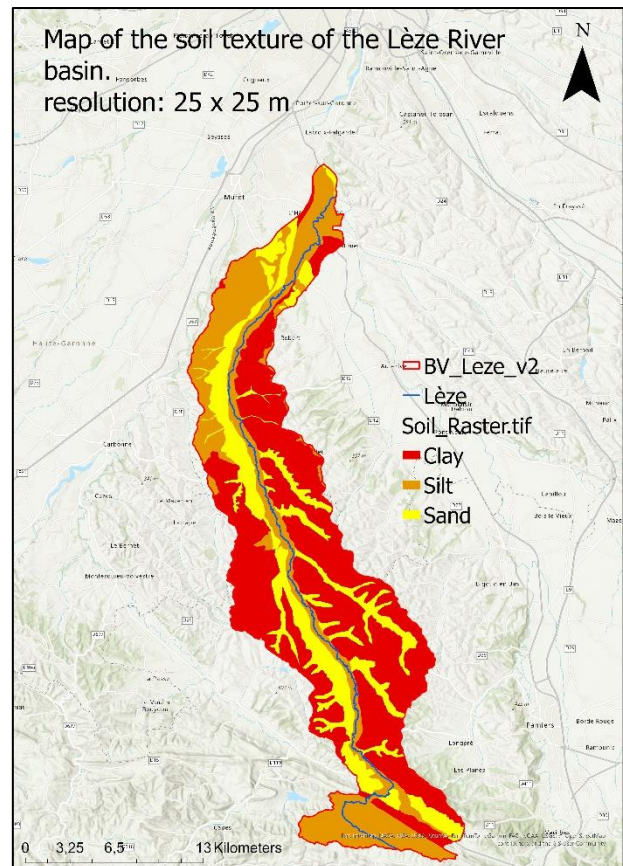


Figure 7 : Carte des textures de sol dominantes dans le bassin versant de la Lèze (Source : Référentiel régional pédologique harmonisé de la région Occitanie, s. d.)

3.1.4. Carte de synthèse du potentiel de base

La combinaison de ces trois paramètres (pente, hydromorphie et texture) aboutit à la carte du potentiel de base, qui met en évidence des contrastes marqués (Figure 8). Les versants abrupts et argileux affichent des valeurs faibles à très faibles (low à very low), tandis que les fonds de vallée dominés par des textures plus fines présentent des valeurs élevées à très élevées (high à very high). L'hétérogénéité du bassin reflète ainsi la diversité des conditions locales et permet d'identifier les secteurs les plus favorables à la rétention naturelle.

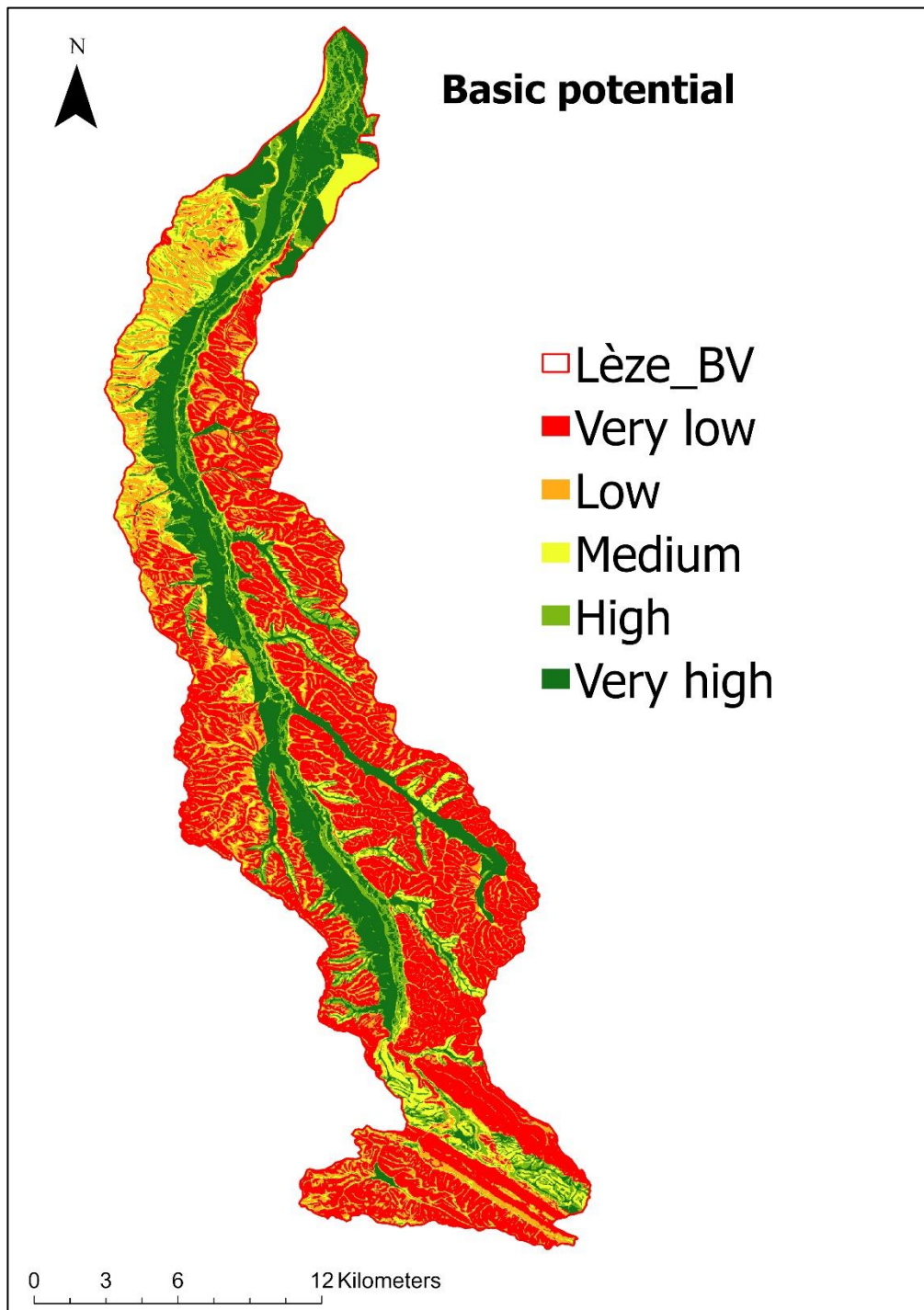


Figure 8 : Carte du potentiel de base de rétention d'eau du bassin versant de la Lèze

3.2. Carte d'occupation des sols

L'occupation des sols reflète la structure paysagère du bassin versant de la Lèze et joue un rôle central dans la traduction du potentiel théorique en capacité effective de rétention. La carte produite montre une prédominance des cultures agricoles (croplands), suivies par les prairies permanentes (permanent grasslands) et les formations forestières (forêts feuillues, résineuses et mixtes). Les zones artificialisées (built-up areas, infrastructures) apparaissent principalement autour des pôles urbains et le long des axes de communication. Les zones humides (wetlands) et plans d'eau permanents (standing waters) sont présentes mais restent minoritaires. On voit ainsi que le bassin versant présente une physionomie caractéristique des paysages ruraux de moyenne montagne en France, marquée par la dominance des zones agricoles et la faible taille des espaces urbains. Cette répartition traduit la pression exercée par les activités anthropiques sur les capacités naturelles de rétention du bassin versant.

On peut observer des différences notables entre la carte d'occupation des sols initiale (Figure 9) et celle produite dans ce travail (Figure 10). Les formations herbacées (herbaceous formations), très dominantes dans la version d'origine, ont été subdivisées en plusieurs catégories distinctes (prairies permanentes, prairies temporaires, cultures, etc.), ce qui offre une représentation beaucoup plus fine de la mosaïque paysagère. De plus, l'intégration des zones humides (wetlands) constitue un apport important, puisqu'elles n'étaient pas représentées dans la carte de base. Ces ajustements permettent de mieux rendre compte des dynamiques écologiques locales et de leur rôle dans la régulation hydrologique.

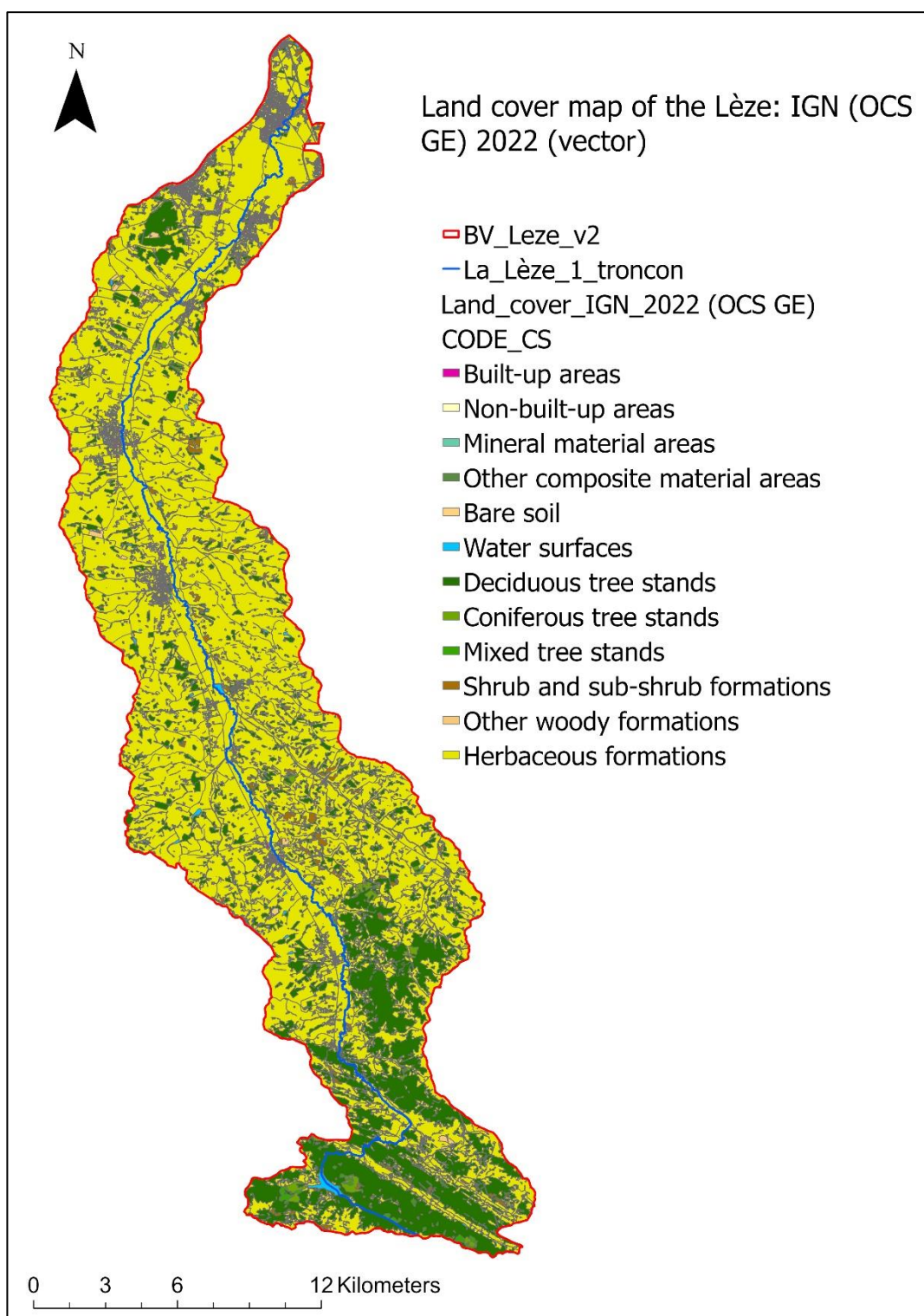


Figure 9 : Carte de l'occupation des sols dans le bassin versant de la Lèze (Source : OCS GE | GéoServices, s. d.)

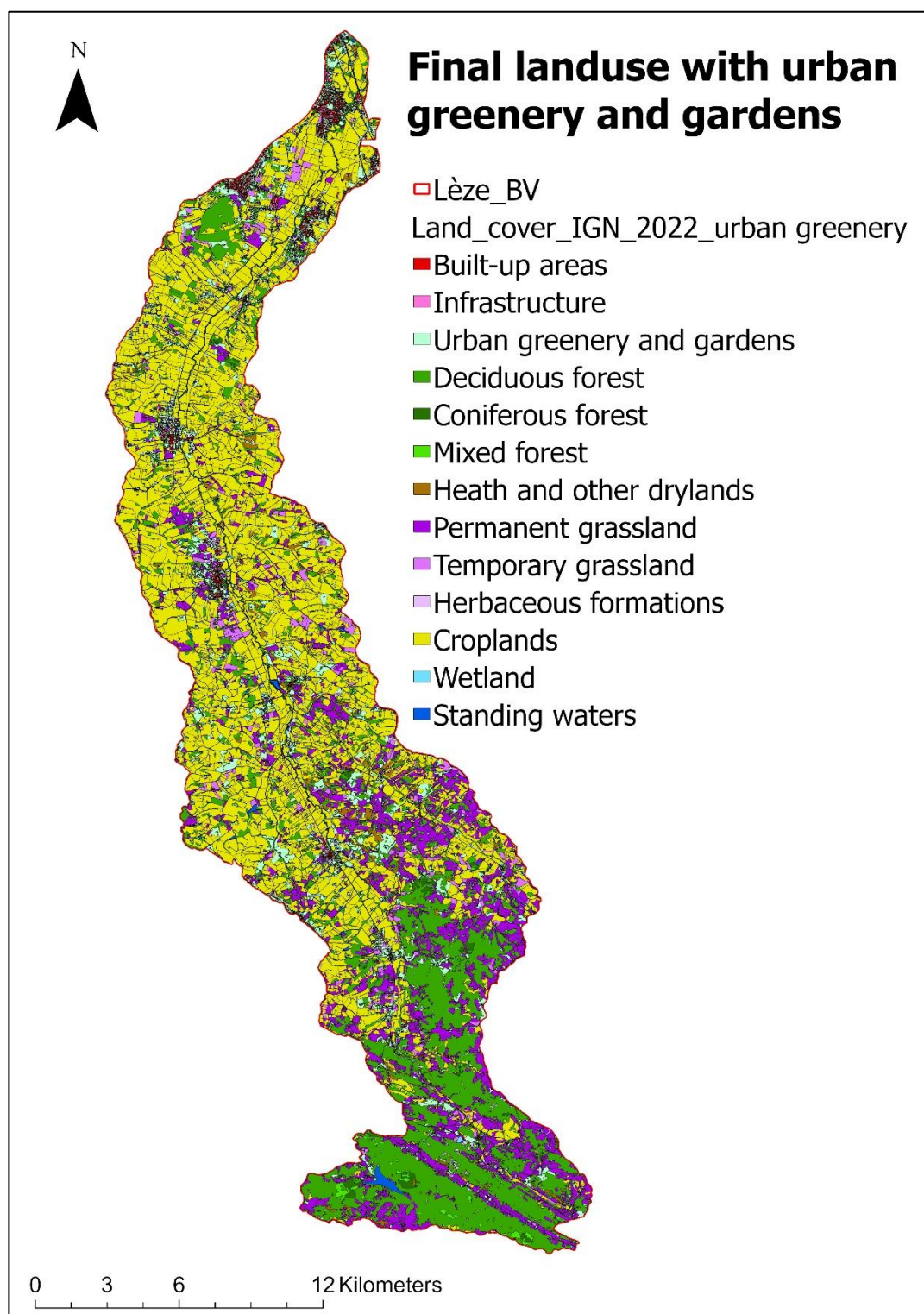


Figure 10 : Carte de l'occupation des sols après les traitements apportés sur ArcGIS

3.3. Carte de la fonction actuelle de rétention d'eau

La fonction actuelle combine le potentiel de base et l'occupation des sols pour restituer la capacité effective de rétention d'eau. La carte obtenue met en évidence une capacité globalement moyenne à faible sur le bassin versant, en raison de la forte proportion de terres agricoles et de zones artificialisées (Figure 11). Les zones forestières, en particulier les forêts mixtes et feuillues (mixed and deciduous forests), se distinguent par des valeurs élevées à très élevées (high à very high), confirmant leur rôle clé dans la régulation hydrologique. À l'opposé, les zones urbanisées et les infrastructures se caractérisent par des valeurs systématiquement très faibles (very low), indépendamment du potentiel de base sous-jacent.

Les zones les plus défavorisées, visibles en rouge sur la carte, correspondent principalement à des versants marqués par de fortes pentes, des sols argileux et des occupations peu favorables comme les terres agricoles ou les zones artificialisées. Comme mentionné dans la partie méthodologie, la pente constitue un facteur central : les fortes inclinaisons réduisent fortement le potentiel de base, tandis que la présence de sols argileux accentue encore cette limitation. L'effet est renforcé lorsque ces conditions se superposent à des usages anthropiques peu propices à la rétention, ce qui explique la concentration de valeurs faibles à très faibles dans ces secteurs.

Comme mentionné précédemment, certaines entités n'ont pas reçu de valeur de fonction actuelle, notamment les plans d'eau permanents (standing waters) et les cours d'eau (La Lèze), exclus de la méthode de Gänsrich et Wollenweber (1995), ainsi que quelques formations herbacées (herbaceous formations). Ces polygones représentent toutefois une part très marginale et de petite taille, ce qui ne compromet pas la cohérence générale des résultats.

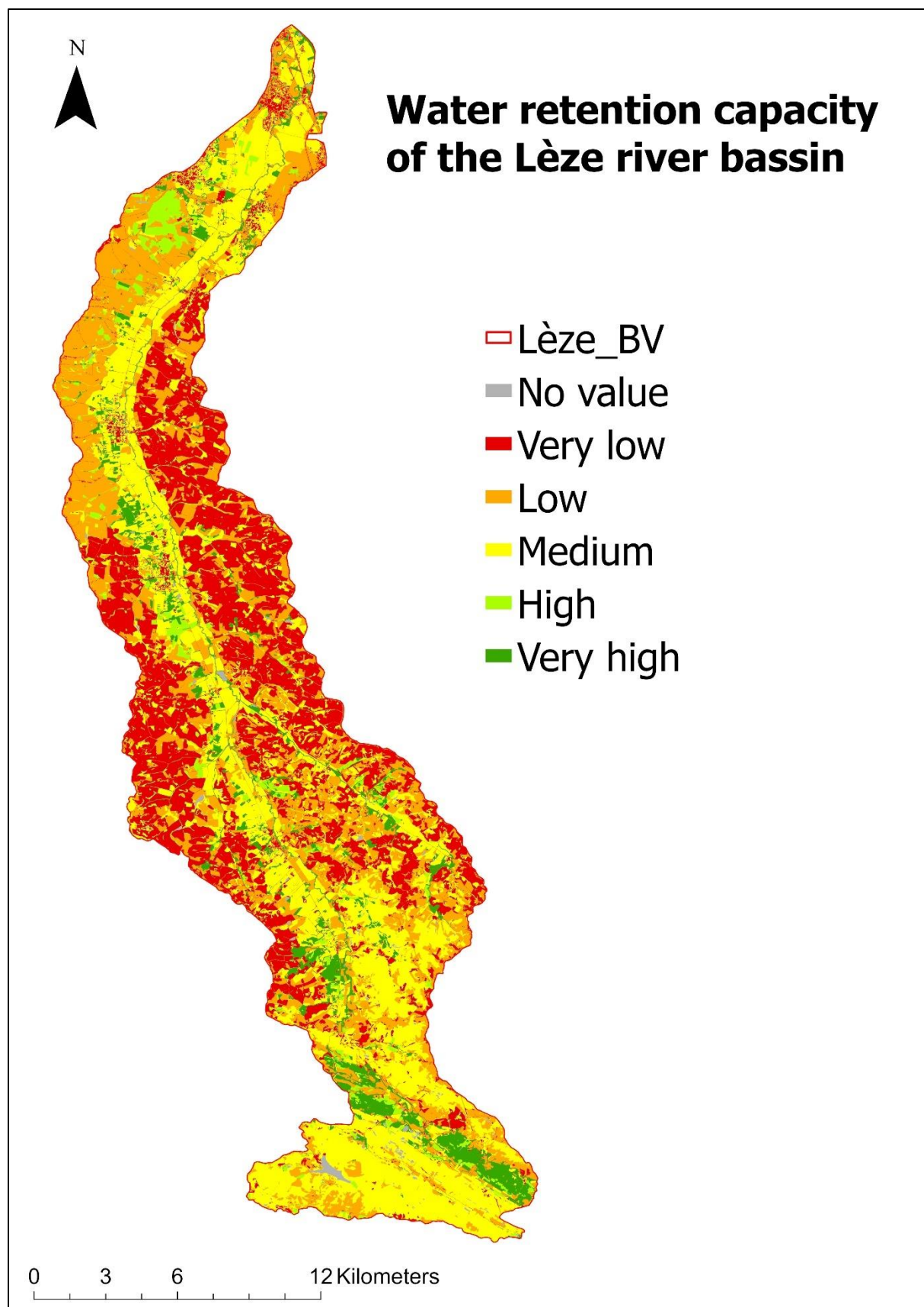


Figure 11 : Carte de la fonction actuelle en rétention d'eau du bassin versant de la Lèze

4. Discussion

4.1. Retour sur les objectifs : ont-ils été atteints ?

Les objectifs de ce travail consistaient à produire une cartographie détaillée du potentiel de rétention d'eau et de la fonction actuelle du bassin versant de la Lèze, en intégrant plusieurs facteurs abiotiques (pente, texture des sols, hydromorphie) ainsi que l'occupation des sols. Dans l'ensemble, ces objectifs ont été atteints, la méthodologie mise en œuvre a permis d'identifier les zones prioritaires pour la préservation et la restauration de la rétention.

Néanmoins, certaines limites demeurent, en particulier concernant la carte d'occupation des sols. Bien qu'elle ait été enrichie par rapport à la base initiale, avec une meilleure différenciation des formations herbacées et l'ajout des zones humides, elle n'intègre pas l'ensemble des catégories prévues, telles que les parcs et espaces récréatifs, l'horticulture sous serre, les sites d'extraction minérale ou encore les eaux récréatives. Ces absences traduisent à la fois les contraintes liées aux jeux de données disponibles et les spécificités de chaque territoire, qui ne permettent pas systématiquement de disposer de l'ensemble des catégories d'occupation des sols souhaitées.

4.2. Pertinence des méthodes employées

La méthode employée se distingue par sa capacité à combiner plusieurs dimensions, topographie, sols et occupation des sols, pour produire une vision intégrée de la fonction hydrologique. Elle est donc généralisable, mais seulement à condition de disposer des données requises. Dans certains cas, notamment lorsque la carte d'occupation des sols n'est pas complète, il peut être nécessaire d'adapter la méthodologie proposée par Gänssrich et Wollenweber afin de l'ajuster au contexte local. Cette approche reste scientifiquement pertinente puisqu'elle prend en compte la complexité des processus naturels.

Le bassin de la Lèze, situé dans les contreforts pyrénéens, se caractérise par une topographie contrastée et un paysage agricole dominé par les cultures et prairies. À titre de comparaison, le bassin versant de l'Aa, aux Pays-Bas, également étudié dans le cadre de SpongeWorks, est presque totalement plat et présente une structure paysagère très différente. Ces différences illustrent le caractère contextuel de la méthode : chaque bassin versant possède des spécificités qui imposent une adaptation fine et une interprétation des résultats qui se veuille à la fois prudente et contextualisée.

4.3. Difficultés rencontrées et choix méthodologiques

La principale difficulté réside dans la qualité et la précision des données mobilisées. Les données pédologiques, issues de bases régionales, manquent de résolution locale et peuvent réduire la finesse des résultats. De même, les données d'hydromorphie fournissent des informations utiles mais trop générales pour capturer les variations fines de la nappe phréatique. Les données d'occupation des sols ont constitué un autre défi : le jeu de données initial comptait environ 20 000 entités, ce qui est déjà très fragmenté. Après les traitements, le jeu final dépasse 30 000 polygones, ce qui complique les analyses spatiales. De plus,

certaines incohérences apparaissent dans la légende, comme des zones rocheuses voisines qui par le bien d'une observation satellite semble identique mais qui sont classées alternativement en sols nus ou en forêt de feuillu. Ces limites rappellent que la méthode est fortement dépendante de la qualité des données d'entrée et que leur interprétation nécessite une vigilance constante.

4.4. Limites de l'étude

La principale limite à la méthodologie de calcul de la capacité de rétention d'eau est que la méthode ne permet pas de fournir des résultats chiffrés précis. Elle repose sur une classification qualitative allant de « Very low » à « Very high ». Cette approche comparative est utile pour hiérarchiser les secteurs mais ne donne pas de valeurs concrètes de capacité de rétention. Par conséquent, on ignore ce que représente exactement une valeur « Low » en termes de millimètres d'eau retenus. Cette abstraction limite la possibilité de relier directement les résultats à des événements hydrologiques (pluies extrêmes, crues).

En effet, une approche quantitative, exprimée par exemple en volume d'infiltration (m^3/m^2) ou en équivalent pluie (mm/m^2), permettrait d'identifier les zones les plus à risque. Elle offrirait également aux décideurs et gestionnaires des bases scientifiques plus solides pour hiérarchiser les interventions et anticiper les impacts des inondations.

4.5. Pistes d'amélioration et prolongements possibles

Plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées. La première consisterait à quantifier explicitement la capacité de rétention en termes mesurables, comme le volume d'infiltration en m^3/m^2 ou l'équivalent pluie en millimètres. Ensuite, un affinage des données serait nécessaire, en mobilisant des bases pédologiques et hydromorphologiques locales, mieux adaptées à l'échelle du bassin. Enfin, l'application de la méthode à d'autres bassins contrastés, qu'ils soient montagnards, de plaine ou forestier, constituerait également une piste intéressante pour tester sa robustesse et sa transférabilité.

4.6. Repositionnement par rapport à la littérature

L'approche développée sur le bassin versant de la Lèze s'inscrit dans une dynamique visant à spatialiser les fonctions hydrologiques à l'aide d'outils SIG, dans une perspective d'aménagement. Ce positionnement peut être éclairé par la comparaison avec deux travaux scientifiques, qui mobilisent également des méthodologies spatiales pour évaluer la rétention d'eau.

Le premier est celui de Pechanec et al. (2014), qui proposent une modélisation de la capacité de rétention hydrique du paysage à travers une combinaison de données environnementales intégrées dans un système SIG. Leur démarche repose sur l'utilisation de modèles spatiaux pour quantifier la rétention potentielle à l'échelle régionale, avec une attention particulière portée à l'influence des facteurs d'occupation des sols et de morphologie du terrain. L'objectif principal était de fournir des outils de modélisation génériques, utiles pour l'évaluation des services écosystémiques. Comparée à cette approche, l'étude de la Lèze se distingue par une échelle d'application plus fine et par une orientation plus opérationnelle, destinée à soutenir

directement des stratégies locales d'aménagement. Alors que Pechanec et al. privilégient une logique de modélisation scientifique, le travail sur la Lèze cherche à traduire ces résultats en leviers concrets pour la planification territoriale.

Le second exemple est celui de Pawattana & Tripathi (2022), qui mobilisent une approche multicritère fondée sur l'Analytical Hierarchical Process (AHP) pour identifier les zones prioritaires de rétention d'eau en Thaïlande. L'AHP est une méthode d'aide à la décision qui repose sur la pondération hiérarchique de critères (pente, sol, occupation du sol, précipitations, etc.) afin de produire une cartographie des zones favorables à l'implantation de mesures de rétention. Cette étude illustre l'intérêt des outils multicritères pour hiérarchiser les interventions, dans un contexte de gestion des inondations. L'analyse de la Lèze partage avec ce travail l'idée de croiser plusieurs paramètres pour évaluer la rétention hydrologique, mais s'en distingue par son cadre conceptuel : plutôt que d'utiliser un outil de pondération décisionnelle, elle applique une matrice d'évaluation normalisée (Gänsrich & Wollenweber, 1995), ce qui garantit une reproductibilité méthodologique mais limite la flexibilité dans l'adaptation aux contextes locaux.

Ainsi, comparée à ces deux travaux, l'étude de la Lèze occupe une position intermédiaire et originale. Elle se rapproche de Pechanec et al. (2014) par son ancrage biophysique et sa volonté de modéliser la capacité hydrologique, mais en diffère par une orientation plus pratique et territorialisée. Elle rejoint Pawattana & Tripathi (2022) dans la perspective de fournir un outil d'aide à la décision pour l'aménagement, mais adopte une approche moins multicritère et plus normative. Cette double filiation, entre modélisation écologique et planification opérationnelle, confère à l'étude une contribution spécifique, qui met en évidence la valeur ajoutée de relier des indicateurs biophysiques simples à une logique d'aménagement paysager.

4.7. Leçons tirées

Ce travail permet de tirer plusieurs enseignements. Tout d'abord, la qualité des résultats dépend étroitement de la précision et de la cohérence des données d'entrée, ce qui rappelle la nécessité de données fiables et homogènes. Ensuite, il apparaît clairement que chaque bassin versant est unique et nécessite une adaptation méthodologique, ce qui est pertinent dans les Pyrénées ne l'est pas nécessairement dans les plaines néerlandaises. De plus, une approche qualitative est utile pour établir des priorités spatiales, mais elle doit être complétée par des indicateurs quantitatifs pour devenir pleinement opérationnelle. Enfin, l'implication des acteurs locaux, en particulier agricoles, constitue un facteur essentiel, dans un bassin largement rural comme celui de la Lèze, l'évolution des pratiques agricoles représente un levier plus réaliste et plus efficace que la transformation des zones urbanisées.

5. Retour réflexif

5.1. Une expérience professionnelle et technique enrichissante

Ce stage a constitué une étape essentielle de mon parcours, tant sur le plan académique que personnel. Il m'a permis de m'immerger pour la première fois dans un climat de travail exclusivement professionnel, au sein d'une équipe de chercheurs et d'ingénieurs. Contrairement à mes expériences antérieures, davantage liées à des cours ou à des projets académiques, il s'agissait ici de ma première expérience concentrée uniquement sur un travail de bureau, avec ses codes, ses réunions régulières et ses échanges collectifs. Cette immersion m'a permis de découvrir la dynamique d'un environnement de recherche appliquée, dans lequel l'autonomie, la rigueur et la capacité à collaborer sont essentielles.

Sur le plan technique, j'ai pu progresser de manière significative dans l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG). Je dois reconnaître qu'avant ce stage, je n'étais pas particulièrement attiré par ces outils, que je percevais comme complexes et parfois rébarbatifs lors des cours théoriques. Pourtant, en les utilisant dans un cadre appliqué et concret, j'ai découvert leur potentiel et j'ai appris à les apprécier. J'ai pu approfondir mes compétences en manipulation de données spatiales, en cartographie et en analyse environnementale, et j'ai aussi développé des capacités de présentation visuelle et de vulgarisation scientifique. Cette appropriation des SIG constitue à mes yeux l'un des acquis les plus précieux de ce stage.

L'expérience a également représenté un apprentissage important en termes de communication. J'ai participé pour la première fois à des réunions d'équipe régulières. Ces réunions m'ont semblé difficiles au début : la prise de parole en public n'a jamais été un exercice naturel pour moi, et le contexte d'une réunion technique, avec des collègues plus expérimentés, renforçait ce sentiment. Cependant, à force de pratique, j'ai gagné en aisance, et je me suis rendu compte que ces moments d'échange sont non seulement nécessaires pour coordonner un travail collectif, mais aussi particulièrement enrichissants. Ils permettent de confronter ses idées, d'apprendre des autres et de mieux comprendre les attentes globales d'un projet. Ce progrès m'a donné plus de confiance dans ma capacité à m'exprimer clairement et à défendre mes choix méthodologiques.

5.2. Un apprentissage international et culturel

Un élément clé de ce stage réside dans le fait qu'il s'est déroulé à l'étranger, à Hanovre. Travailler dans un contexte international, avec des collègues majoritairement anglophones, a ajouté un degré supplémentaire de difficulté, mais aussi d'intérêt. La barrière de la langue rendait les échanges plus exigeants, notamment lors des réunions, mais cette contrainte a finalement constitué un moteur de progression. J'ai pu améliorer considérablement mon anglais, tant à l'oral qu'à l'écrit, et je me suis surpris à apprécier l'exercice, là où je pensais initialement que cela constituerait un obstacle. Cette expérience m'a donné confiance dans ma capacité à travailler dans un environnement international et m'a ouvert l'envie d'envisager un parcours professionnel à l'étranger, dans des villes pionnières de la transition écologique comme Copenhague, Amsterdam ou Berlin.

Au-delà des aspects techniques et linguistiques, ce stage m’a offert une ouverture culturelle. Bien que la culture allemande soit proche de la culture française, certaines différences subsistent, et il a été enrichissant de les expérimenter. De plus, mon semestre Erasmus à Hanovre, qui précédait ce stage, m’avait déjà familiarisé avec le contexte local, ce qui m’a permis de m’intégrer plus facilement. Ce double cadre (académique puis professionnel) a renforcé mon attachement à l’idée que les expériences internationales constituent une formation en elles-mêmes, en confrontant à de nouveaux modes de pensée, d’organisation et de travail.

5.3. Une réflexion critique sur le rôle de l’aménagement

Toutefois, ce retour réflexif ne serait pas complet sans une vision critique. En travaillant sur la cartographie de la rétention d’eau, je n’ai pas pu m’empêcher de m’interroger sur l’impact réel de ce type de projet. Bien sûr, produire des cartes et des analyses constitue un outil précieux pour mieux comprendre et planifier l’aménagement du territoire. Mais je garde le sentiment que ces efforts, aussi utiles soient-ils, restent limités tant que les leviers politiques et économiques ne suivent pas. Les enjeux environnementaux exigent des transformations profondes, et les outils techniques seuls ne suffisent pas. Comme l’exprime Aurélien Barrau (2019), le dérèglement climatique et la destruction du vivant nécessitent des changements radicaux dans nos modes de vie et de gouvernance, bien au-delà de simples ajustements techniques. De même, Jean-Marc Jancovici souligne que la question énergétique et climatique ne peut être résolue sans une remise en cause de notre modèle économique fondé sur la croissance et la consommation (Jancovici, 2021). Ces réflexions ont accompagné mon stage et m’ont conduit à relativiser la portée de mon travail : utile, certes, mais insuffisant à lui seul pour provoquer une transformation structurelle.

Ces questionnements prennent une dimension particulière dans le contexte du bassin versant de la Lèze, où les pratiques agricoles dominent largement l’occupation des sols. Les résultats de mon étude concernent directement les agriculteurs, qui seraient les premiers acteurs sollicités pour modifier leurs pratiques afin d’améliorer la rétention d’eau. Cependant, ces mêmes agriculteurs sont souvent victimes d’un système économique qui les contraint à maintenir des pratiques intensives et peu durables pour assurer leur survie financière. Comme le montre le rapport de l’INRAE sur les résultats économiques des exploitants agricoles, près de 15 % des exploitations agricoles françaises seraient structurellement fragiles, cumulant faible productivité du travail, efficience réduite et endettement élevé, limitant ainsi leur capacité à changer de pratiques (Résultat Économique des Exploitations Agricoles et Revenu des Agriculteurs, une Très Grande Hétérogénéité, s. d.).

Cette prise de conscience a été renforcée par mon expérience personnelle lors d’un stage précédent en maraîchage biologique. En travaillant directement sur le terrain, j’ai pu constater à quel point le quotidien d’un agriculteur est exigeant et marqué par une forte incertitude, qu’il s’agisse des conditions climatiques, de la pression économique ou des contraintes réglementaires. Cette immersion m’a permis de mieux comprendre les logiques de production, mais aussi la vulnérabilité d’un secteur souvent accusé d’être un problème environnemental alors qu’il est avant tout un maillon fragilisé d’un système économique global. Ce vécu m’a donné une sensibilité particulière aux enjeux agricoles et m’a aidé à prendre conscience que l’on ne peut pas demander un changement radical à des agriculteurs

qui peinent déjà à maintenir leur activité. En ce sens, je considère que les politiques publiques doivent jouer un rôle central, en offrant un accompagnement économique et technique, plutôt que de transférer toute la responsabilité sur les exploitants.

En définitive, ce stage m'a permis de renforcer mes compétences techniques, de m'ouvrir davantage au travail collectif et international, et d'approfondir ma réflexion sur le rôle de l'aménagement dans la transition écologique. Il m'a donné envie de poursuivre dans cette voie, mais aussi de garder un regard critique sur la portée réelle de ces démarches. L'ingénieur ou l'aménageur a un rôle à jouer, mais celui-ci ne prend sens que dans un cadre politique et collectif qui soutient véritablement les changements nécessaires. C'est probablement là l'une des leçons les plus importantes de cette expérience : apprendre à conjuguer rigueur scientifique, compréhension sociale et lucidité politique.

6. Conclusion

En conclusion, ce stage de fin d'études s'est imposé comme une étape décisive dans mon parcours d'ingénieur. Il m'a permis non seulement d'acquérir des compétences techniques solides en analyse spatiale et en traitement de données géographiques, mais aussi de comprendre le rôle stratégique que ces outils peuvent jouer dans l'aide à la décision en aménagement et gestion environnementale. L'élaboration de cartes de potentiel de base, d'occupation des sols et de fonction actuelle m'a sensibilisé à l'importance d'une démarche rigoureuse et structurée, où chaque choix méthodologique influe directement sur la qualité et la pertinence des résultats obtenus.

Ce stage a également joué un rôle d'orientation pour mon avenir professionnel. Il m'a donné un aperçu concret du type de missions auxquelles je souhaite contribuer, en m'aidant à clarifier la place que je voudrais occuper entre recherche appliquée, expertise technique et accompagnement des acteurs locaux. J'ai pris conscience que mon intérêt ne réside pas uniquement dans l'utilisation des outils SIG, mais aussi dans la capacité à traduire ces analyses en recommandations opérationnelles. Ce stage a donc agi comme un révélateur de ma volonté de travailler dans des structures où l'expertise technique rencontre l'action publique, dans le but de développer des projets concrets au service de la transition écologique.

Enfin, cette expérience m'a apporté une compréhension plus fine des conditions qui rendent un diagnostic environnemental pertinent. Elle a mis en évidence la dépendance des résultats à la qualité des données d'entrée, ainsi que la nécessité de toujours confronter l'analyse spatiale aux réalités de terrain. Cette leçon méthodologique, que je retiens comme centrale, me servira tout au long de ma carrière. Elle rappelle que les outils scientifiques ne prennent tout leur sens qu'à condition d'être intégrés dans une démarche critique, transparente et collective. En ce sens, ce stage clôt mon parcours académique en me donnant la confiance et la lucidité nécessaires pour aborder la suite de mon parcours professionnel.

7. Bibliographie

Albert, C., Galler, C., & von Haaren, C. (2022). *Landschaftsplanung* (2e éd.). Eugen Ulmer KG. <https://doi.org/10.36198/9783838585796>

Alonso, J., Rey, G., Castro, P., & Guerra, C. (2007). *GIS-based land use planning and watershed monitoring as tools for sustainable development*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 106, 207–216. <https://doi.org/10.2495/ECO070201>

Barrau, A. (2019). *Le plus grand défi de l'histoire de l'humanité*. Michel Lafon.

BD ALTI® | GéoServices. (s. d.). <https://geoservices.ign.fr/bdalti>

Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. (s. d.). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

de Forges, A. R., Feller, C., Jamagne, M., & Arrouays, D. (2008). *Perdus dans le triangle des textures*. Études et gestion des Sols, 15(2), 97-111. <https://hal.inrae.fr/hal-02662838>

Données d'artificialisation issues de l'OCS GE | GéoServices. (s. d.). <https://geoservices.ign.fr/artificialisation-ocs-ge>

Gänsrich, C. & Wollenweber, I. (1995). *Retention: Eine Methodenuntersuchung zur Planungspraxis*. Institut für Landschaftspflege und Naturschutz.

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). (2022). *Occupation du sol à grande échelle (OCS GE) – Description de contenu*. Version 1.1. <https://geoservices.ign.fr/documentation/donnees/vecteur/ocsge>

Jancovici, J. M. (2021). *Le Monde sans fin-Miracle énergétique et dérive climatique*. Dargaud.

Kuok, K. K., Chiu, P. C., Rahman, M. R., Said, K. A. B. M., & Chin, M. Y. (2023). Evaluation of total infiltration and storage capacities for different soil types in Sarawak using SWMM. *Discover Water*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s43832-023-00042-0>

OECD. (2024). *Nature-based Solutions for Flood Management in Asia and the Pacific* (OECD Development Centre Working Papers, No. 351). OECD Publishing. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/03/nature-based-solutions-for-flood-management-in-asia-and-the-pacific_da08c7b0/f4c7bcbe-en.pdf

OCS GE | GéoServices. (s. d.). <https://geoservices.ign.fr/ocsge>

Pechanec, V., Cudlín, P., Machar, I., Brus, J., & Kilianová, H. (2019). Modelling of the Water Retention Capacity of the Landscape. Dans Springer water (p. 225-248). https://doi.org/10.1007/978-3-030-18363-9_10

Pawattana, C., & Tripathi, N. K. (2008). Analytical Hierarchical Process (AHP)-Based Flood Water Retention Planning in Thailand. GIScience & Remote Sensing, 45(3), 343-355. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.3.343>

Référentiel Régional Pédologique harmonisé de la région Occitanie. (s. d.). <https://www.data.gouv.fr/datasets/referentiel-regional-pedologique-harmonise-de-la-region-occitanie/>

Résultat économique des exploitations agricoles et revenu des agriculteurs, une très grande hétérogénéité. (s. d.). INRAE Institutionnel. <https://www.inrae.fr/actualites/resultat-economique-exploitations-agricoles-revenu-agriculteurs-tres-grande-heterogeneite>

RPG | GéoServices. (s. d.). <https://geoservices.ign.fr/rpg>

SpongeWorks. (2024). SpongeWorks. [spongeworks.eu.](https://spongeworks.eu/) <https://spongeworks.eu/>
Syndicat mixte interdépartementale de la Vallée de Lèze. (s. d.). <https://www.smival.fr/le-bassin-versant-de-la-leze/>

Urban sustainability in Europe – opportunities for challenging times. (s. d.). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-sustainability-in-europe>

Zones Humides Effectives sur le bassin Adour Garonne. (s. d.). Picto-Occitanie. <https://catalogue.picto-occitanie.fr/geonetwork/apps/api/records/ed895b88-ffdc-4ac4-bca1-718294e8fef4>



POLYTECH
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Axel KHELADI
2024-2025

Planning sponge landscapes to enhance climate resilience

This internship focused on assessing water retention capacity and current hydrological function in the Lèze River watershed (France) using GIS-based spatial analysis. The methodology combined slope, soil texture, hydromorphy, and land use data to generate detailed maps at the watershed scale. The results highlight the spatial heterogeneity of water retention potential and the strong influence of forests and wetlands compared to agricultural or urban areas. More importantly, the study underlined the critical importance of having high-quality input data to produce a reliable and faithful diagnostic of local hydrological functions. This work illustrates the potential of GIS for ecosystem service mapping, while pointing out the need for better data and quantitative indicators to support land and water management.

Mots Clés : water retention, GIS, land use, hydrological function, input data quality, watershed management

Entreprise : Leibniz University Hannover, Institute of Environmental Planning

Adresse : Herrenhaeuser Str. 2 , 30419 Hannover, Germany

Tuteur entreprise : Christian Albert, Professeur

Tuteur académique : Sabine GREULISH

Annexes

Annexe 1 : Script Python pour le calcul du potentiel de base de rétention d'eau

BLOC 1

```
import arcpy
import numpy as np
from arcpy.sa import *
from collections import Counter
```

BLOC 2

```
#Environment Setup
arcpy.env.workspace = r"C:\Users\axelk\Documents\STAGE WORK LEZE\SIG\LEZE DATA"
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
```

BLOC 3

```
# snap and cell size (optional)
reference_raster = r"C:\Users\axelk\Documents\ArcGIS\Projects\Project 2
LEZE\slope_clip_Resample.tif"
arcpy.env.snapRaster = reference_raster
arcpy.env.cellSize = 25
```

BLOK 4

```
# Input Rasters
hydro_path = r"C:\Users\axelk\Documents\STAGE WORK LEZE\SIG\LEZE
DATA\BASIC_POTENTIAL\hydro_levels.tif"
slope_path = r"C:\Users\axelk\Documents\STAGE WORK LEZE\SIG\LEZE
DATA\BASIC_POTENTIAL\Slope_Resample.tif"
soil_path = r"C:\Users\axelk\Documents\STAGE WORK LEZE\SIG\LEZE
DATA\BASIC_POTENTIAL\Reclass_Soil.tif"
```

Load rasters

```
hydro_ras = arcpy.Raster(hydro_path)
slope_ras = arcpy.Raster(slope_path)
soil_ras = arcpy.Raster(soil_path)
```

BLOCK 5

```
# Convert to NumPy Arrays
hydro = arcpy.RasterToNumPyArray(hydro_ras)
slope = arcpy.RasterToNumPyArray(slope_ras)
soil = arcpy.RasterToNumPyArray(soil_ras)
```

Define consistent NoData value

```
NODATA_VAL = -9999
```

```
#Treat value 0 as NoData (since rasters have no NoData set)
```

```

nodata_mask = (
    (hydro == 0) |
    (slope == 0) |
    (soil == 0)
)

# Replace 0s with -9999 in all arrays
hydro = np.where(hydro == 0, NODATA_VAL, hydro).astype(np.int16)
slope = np.where(slope == 0, NODATA_VAL, slope).astype(np.int16)
soil = np.where(soil == 0, NODATA_VAL, soil).astype(np.int16)

# Initialize output with 0, set NoData where needed
output = np.full(hydro.shape, 0, dtype=np.int16)
output[nodata_mask] = NODATA_VAL

# Confirm it's working
print("Unique values in output (pre-loop):", np.unique(output))

```

BLOC 6

Classification Logic

#changes made to the code to tailor it to the original method's values. The code now iterates over hydrozones first, then soil type, then slope + ignores no soil and no data and peat soils

```

rows, cols = hydro.shape

for i in range(rows):
    for j in range(cols):

        # Skip NoData cells
        if output[i, j] == NODATA_VAL:
            continue

        h = hydro[i, j]
        s = slope[i, j]
        c = soil[i, j]

        # Handle peat soils + no soil == 3 & 5 as NoData
        if c in [3,5]:
            output[i, j] = NODATA_VAL
            continue

        if h == 3:
            if c == 1:
                if s in [1,2,3]:
                    output[i, j] = 5
                elif s == 4:

```

```

        output[i, j] = 4
    elif s == 5:
        output[i, j] = 3
    elif s == 6:
        output[i, j] = 2
elif c == 2:
    if s == 1:
        output[i, j] = 5
    elif s == 2:
        output[i, j] = 4
    elif s == 3:
        output[i, j] = 3
    elif s == 4:
        output[i, j] = 2
    elif s in [5,6]:
        output[i, j] = 1
elif c == 4:
    if s in [1,2]:
        output[i, j] = 3
    elif s == 3:
        output[i, j] = 2
    elif s in [4,5,6]:
        output[i, j] = 1
elif h == 2:
    if c in [1,2,4]:
        if s in [1,2,3,4]:
            output[i, j] = 2
        elif s in [5,6]:
            output[i, j] = 1
elif h == 1:
    if c in [1,2,4]:
        if s in [1,2,3,4,5,6]:
            output[i, j] = 1
# Convert NumPy Array to Raster
lower_left = hydro_ras.extent.lowerLeft
cell_size = hydro_ras.meanCellWidth
output_raster = arcpy.NumPyArrayToRaster(
    output, lower_left, cell_size, cell_size, value_to_nodata=NODATA_VAL
)

# Save Raster and Enforce NoData
output_path = r"C:\Users\axelk\Documents\STAGE WORK LEZE\SIG\LEZE
DATA\BASIC_POTENTIAL\basic_potential_raster_attempt2.tif"
output_raster.save(output_path)

# Force ArcGIS to recognize -9999 as NoData
arcpy.SetRasterProperties_management(output_path, nodata=f"-9999 {NODATA_VAL}")

```

```
# Define projection and build attribute table
arcpy.DefineProjection_management(output_path, hydro_ras.spatialReference)
arcpy.BuildRasterAttributeTable_management(output_path, "Overwrite")

# Final output check
print("Final output raster saved at:", output_path)
print("Unique values in final output:", np.unique(output))
```

Annexe 2 : Tableau de correspondance et reclassement des catégories d'occupation du sol (bassin versant de la Lèze)

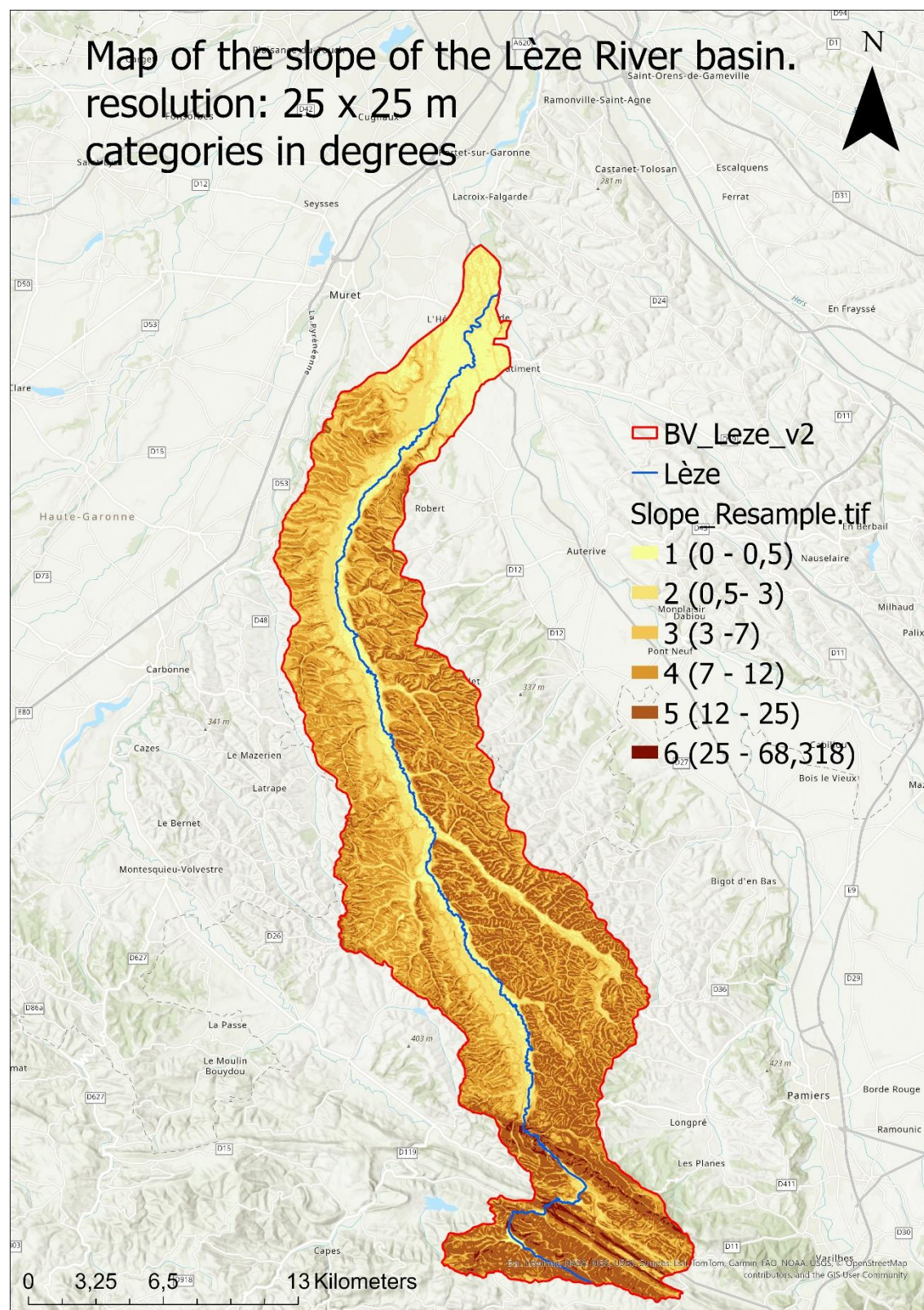
Original land use category The base land use data comes from the OCS GE product (Occupation du sol à grande échelle), available at: https://geoservices.ign.fr/ocsgsge	New land use category	Explanation (if there is a change)
Built-up areas	Built-up areas	
Non-built-up areas	Infrastructure	Definition (non-built-up areas): <i>"Land made impermeable by artificial surfacing asphalt, concrete.</i> <i>Selection:</i> <i>These areas include all land that has been partially or totally sealed, asphalt, concrete, paving stones or tiles. Paved roads, squares, car parks and tennis courts, whatever the surface (hard surface, clay courts), are undeveloped areas."</i> Therefore, this is very similar to the category "Infrastructure."
Mineral material areas	Infrastructure	Definition (Mineral material areas): <i>"Stabilised and compacted soils, partially or totally permeable, covered with mineral materials (stones, earth, gravel, etc.).</i> <i>Selection:</i> <i>This class includes:</i> -<i>networks: railways (rails and ballast), gravel roads, forest tracks or services, non-vegetated firebreaks, transport route worksites (road, motorway, rail, etc.)</i> -<i>surface areas: quarries, salt works, building sites</i> - <i>coastal groynes and riprap."</i> In the watershed, most of the entities in this category are small polygons that often cover driveways, gravel house entrances, or factory parking lots. The definition mentions that these are compacted and stabilized soils, which implies they are anthropogenic. Moreover, there is ambiguity regarding their permeability, which prevents us from classifying them as natural areas. Therefore, I suggest classifying this category under infrastructure.

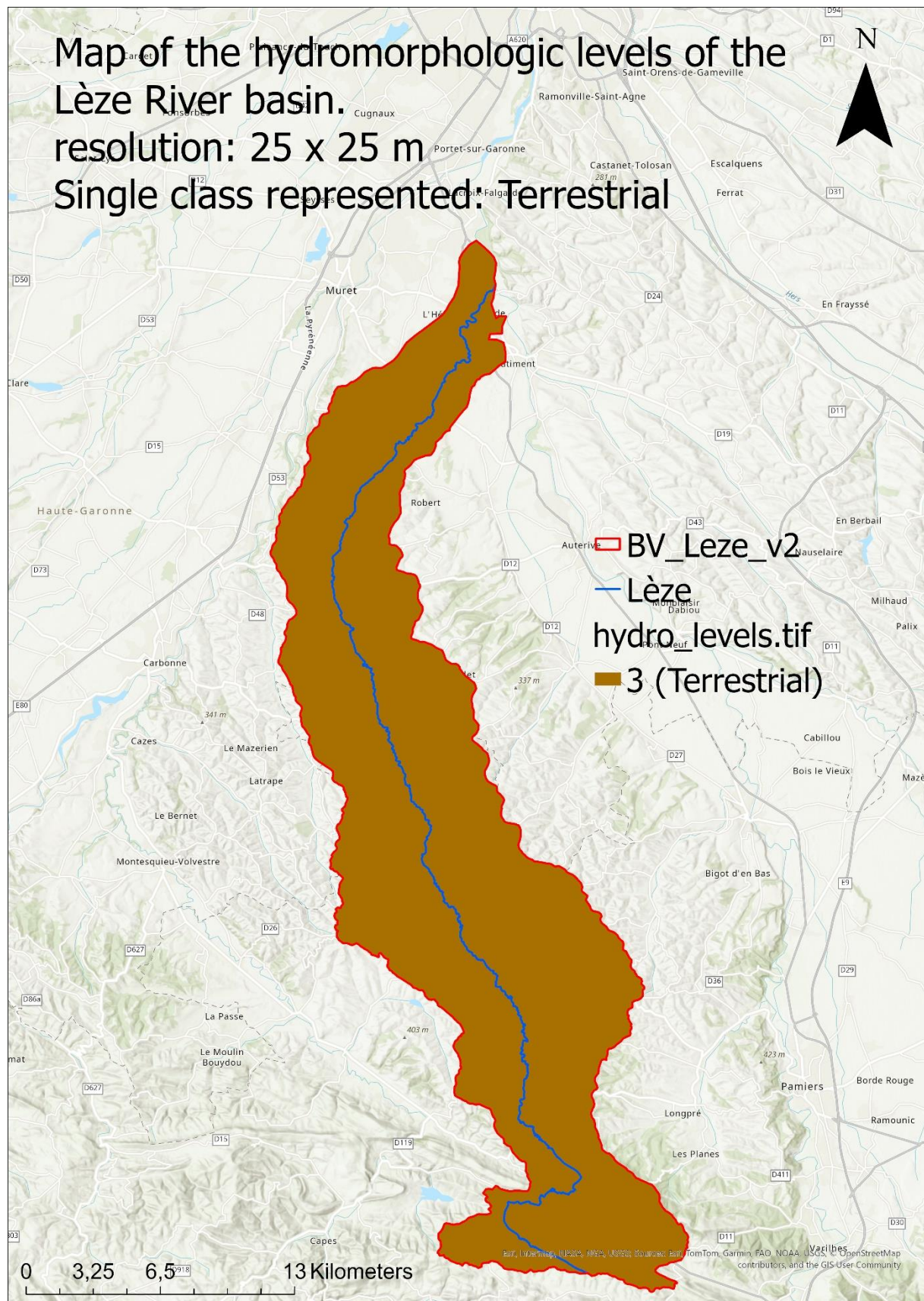
		Here is an example of one of those polygons: 
Bare soil	Deciduous Forest	The bare soil category is represented by five small polygons located in the far south of the watershed, in mountainous areas. These polygons lie in the middle of a large deciduous forest and cover small areas of bare rock. However, in the same forest, nearby areas with very similar visual characteristics (bare rocks) can be observed on satellite imagery but are not classified as “bare soil.” Therefore, I suggest reclassifying these five polygons as “Deciduous forest” for coherence with their surrounding environment. The following screenshots illustrate this: in blue, you can see a selected “bare soil” polygon adjacent to a similar area that is not classified as bare soil. 
Other composite material areas	Infrastructure	The category « Other composite material areas » includes only one polygon, which corresponds to a factory area with gravel roads. These surfaces are very similar in nature and appearance to those found in the “Non-built-up areas” category (e.g. compacted and stabilized gravel surfaces).

		Therefore, I suggest reclassifying this polygon as "Infrastructure" for consistency with the other anthropogenic surfaces. The following screenshot 
Coniferous forest	Coniferous forest	
Deciduous Forest	Deciduous Forest	
Mixed forest	Mixed forest	
Herbaceous formation	Croplands	I am using a dataset from the Registre Parcellaire Graphique (RPG), which provides detailed information on agricultural parcels. It distinguishes between permanent and temporary grasslands, as well as various types of cropland such as wheat, barley, and maize. I group all these crop types into a single category that I refer to as "croplands."
	Permanent grassland	
	Temporary grassland	
	Herbaceous formation (unknown exact land use)	This category corresponds to herbaceous formations that are not considered in the RPG dataset but still qualified as "herbaceous formations".
Shrub and sub-shrub formations	Heath	Definition (Shrub and sub-shrub formations): <i>"This class includes alpine heaths, mountainous heaths, non-wooded scrubland or maquis, uncultivated or fallow land (abandoned cultivated land, in the vicinity of agricultural land, generally small area with clear boundaries, or cultivation recently abandoned and already overgrown), heaths on saline land (heaths located in coastal areas or sea entrance areas: coastal ponds, marshes whose vegetation is mainly composed of halophilic plant species), Phragmites heaths (marshy moorland, temporarily flooded, whose vegetation is mainly composed of Phragmites).</i>

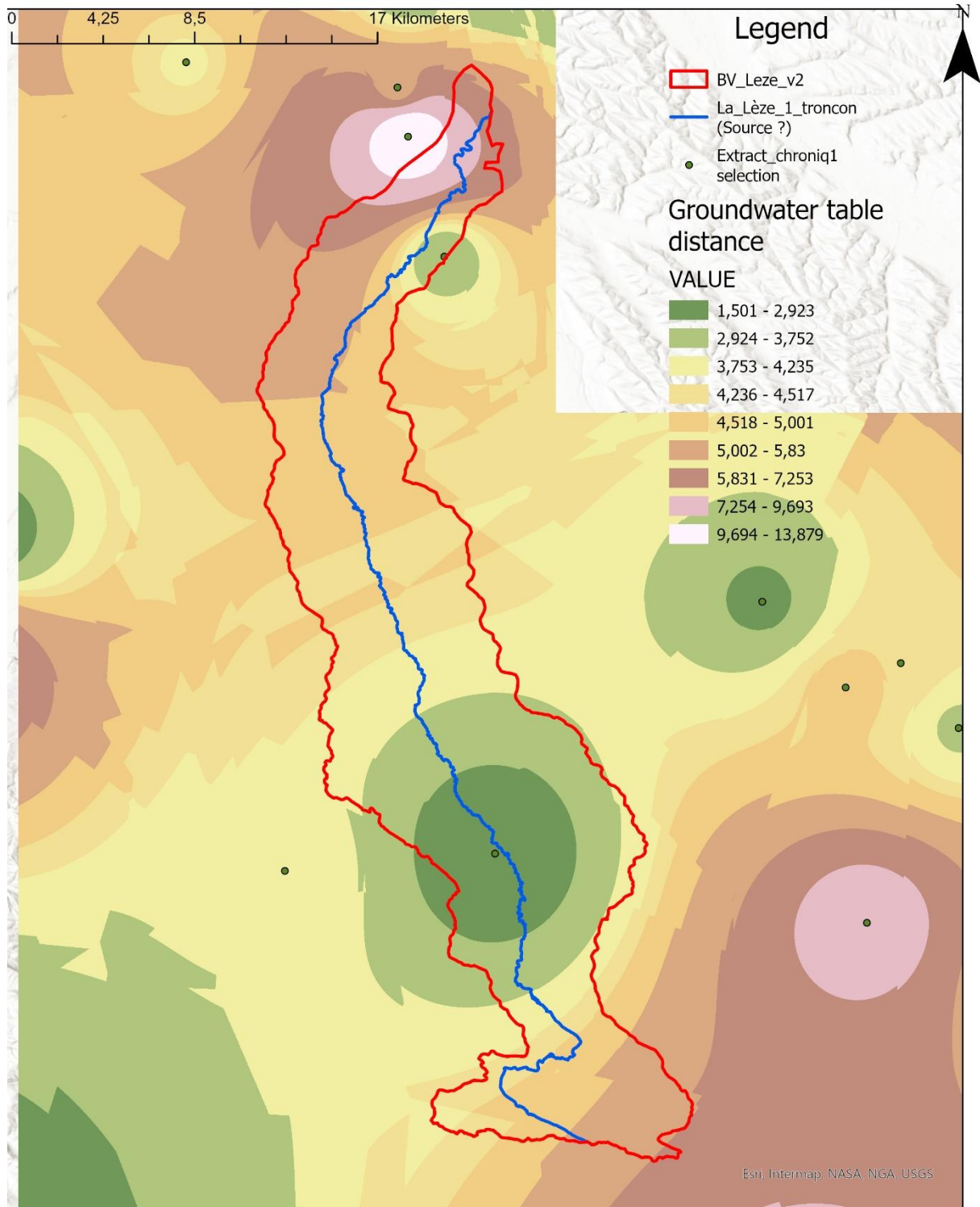
		<i>This class also includes plantations of small fruits, horticultural plants, medicinal plants and aromatic plants...”</i> Therefore, this category clearly corresponds to heath.
Other woody formations	Croplands	Definition (Other woody formations): <i>“Land planted with ligneous lianas.</i> <i>Selection:</i> <i>This class includes plantations of vines, hops, kiwi, etc.”</i> This class includes 27 polygons, each approximately the size of an agricultural plot. Most of them appear to be vineyards, which are very common in southern France, though some may also be orchards. In both cases, these are agricultural areas, often subject to tillage and conventional farming practices. Therefore, I suggest grouping them with the “Croplands” category.
Standing waters	Standing waters	
No data for the wetland	Wetland	This data has been imported from a wetland dataset.

Annexe 3 : Ensemble des cartes présentées dans le rapport en format agrandi

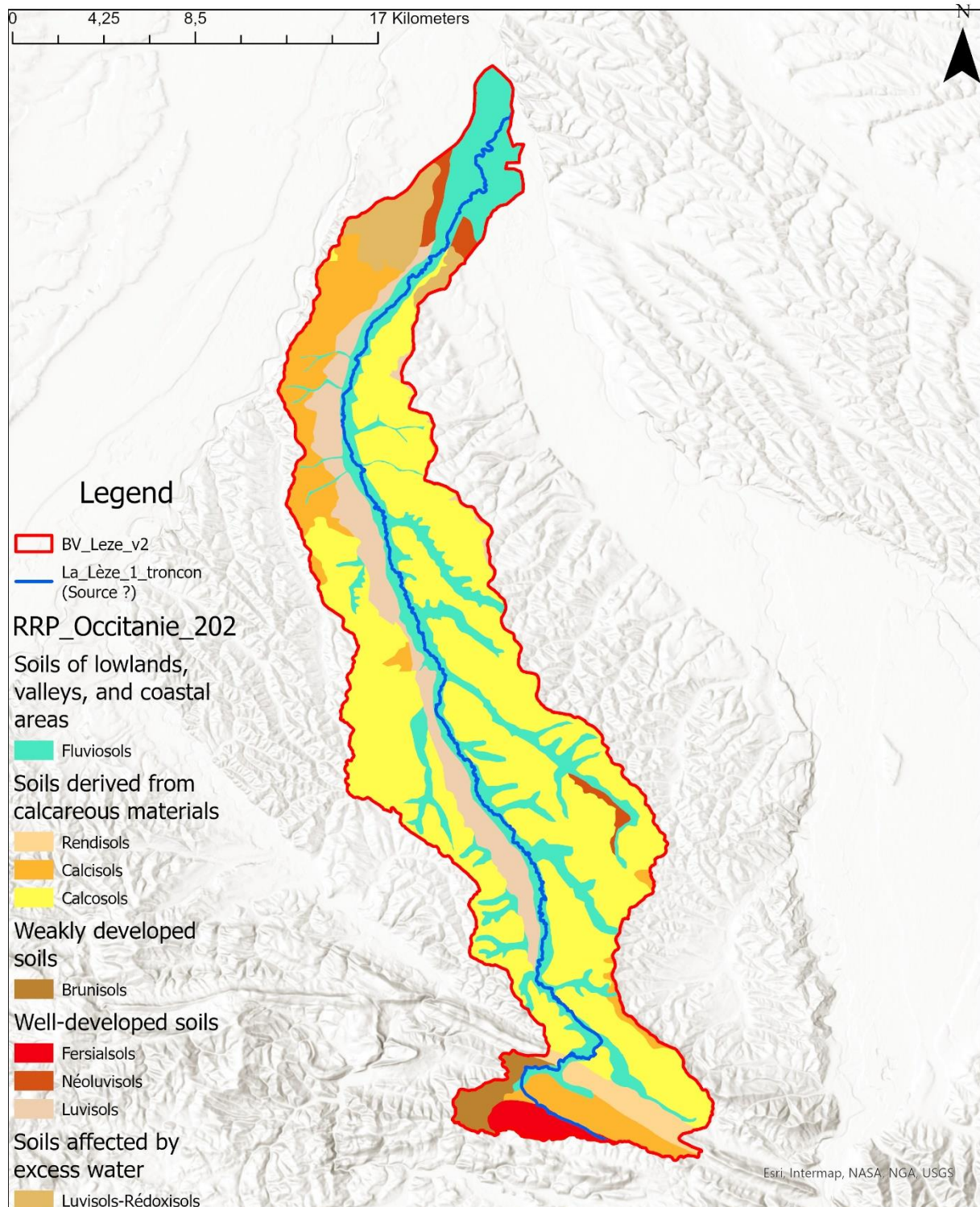


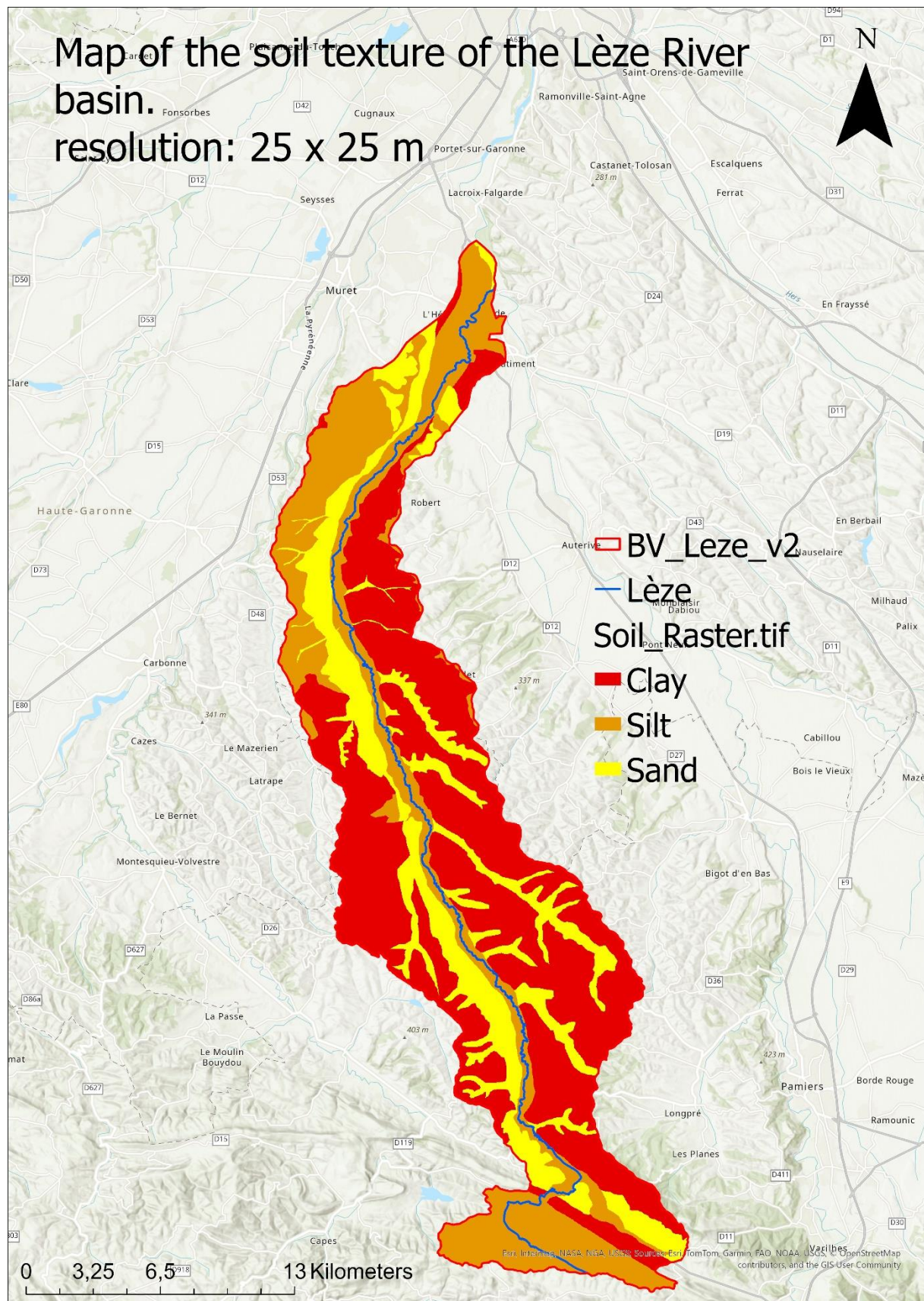


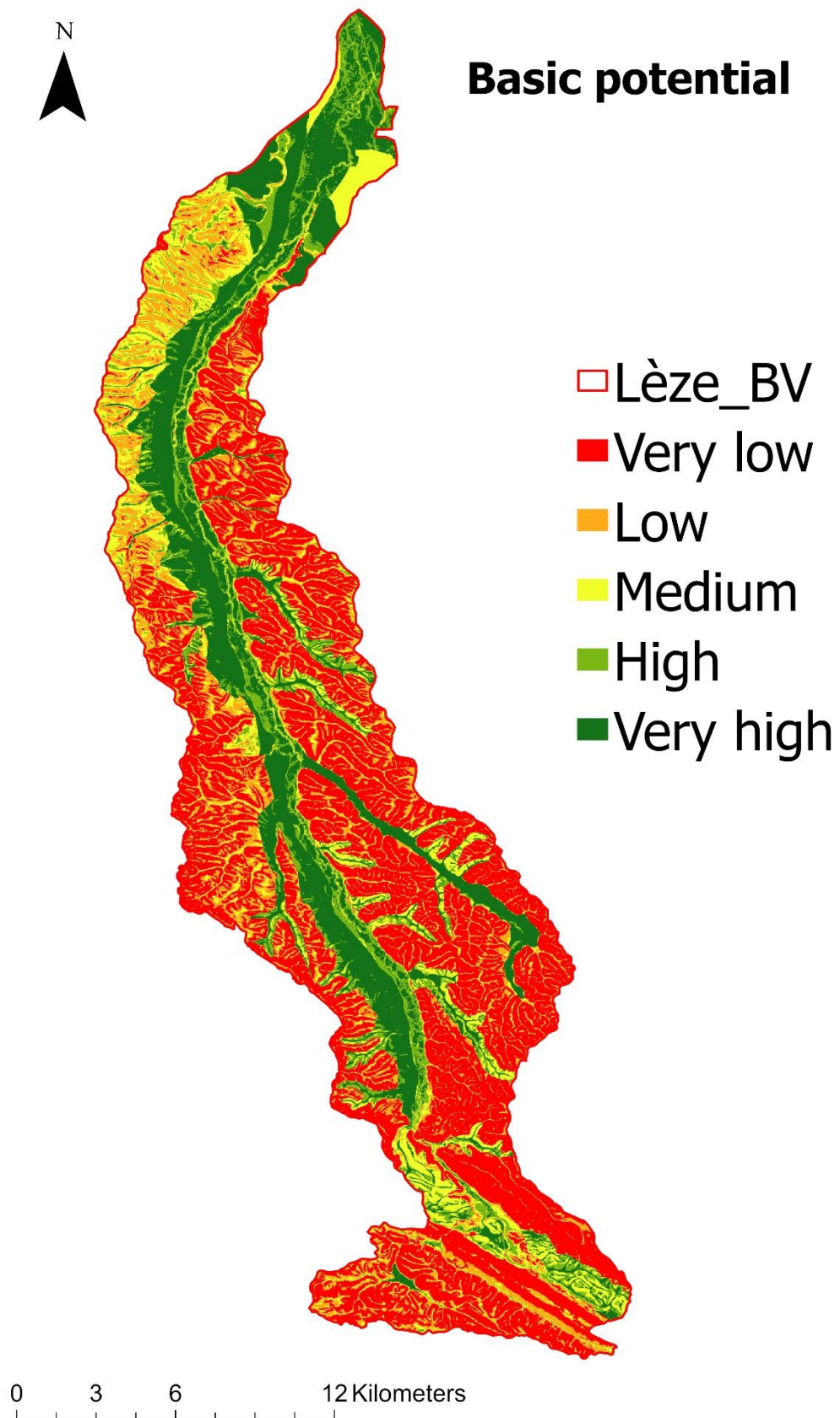
Groundwater table distance

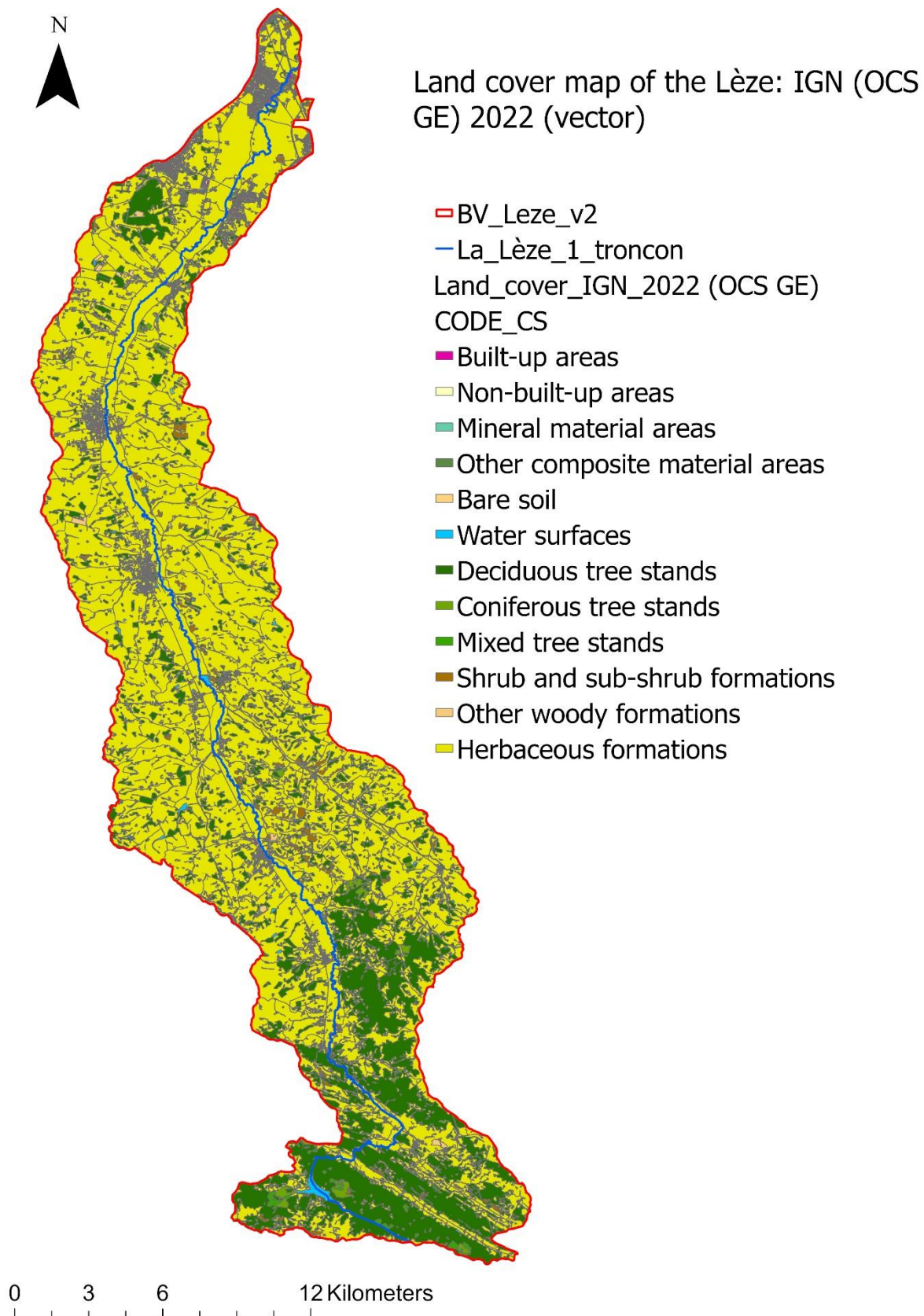


Soil types according to the French soil classification.



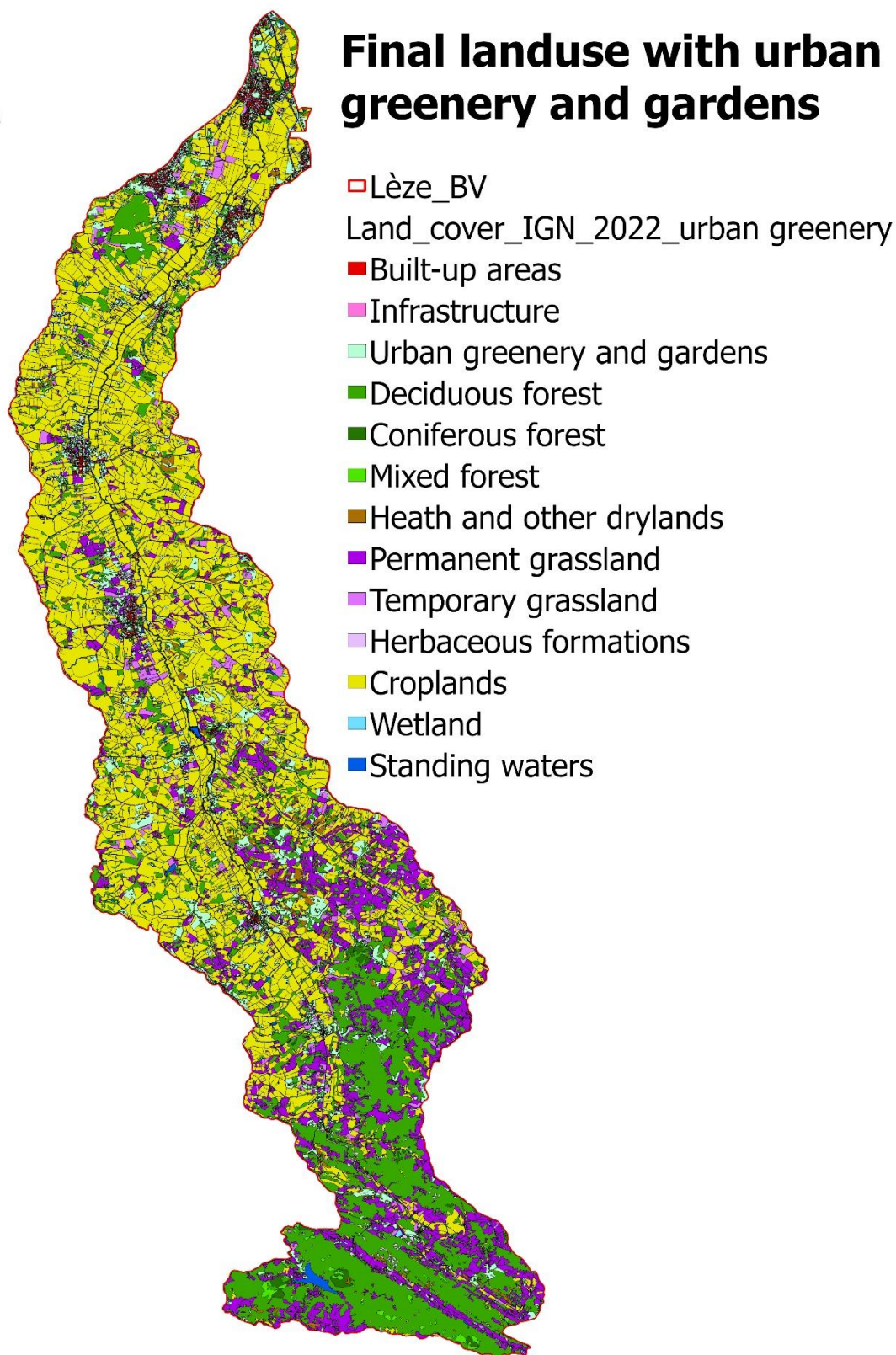








Final landuse with urban greenery and gardens



0 3 6 12 Kilometers

