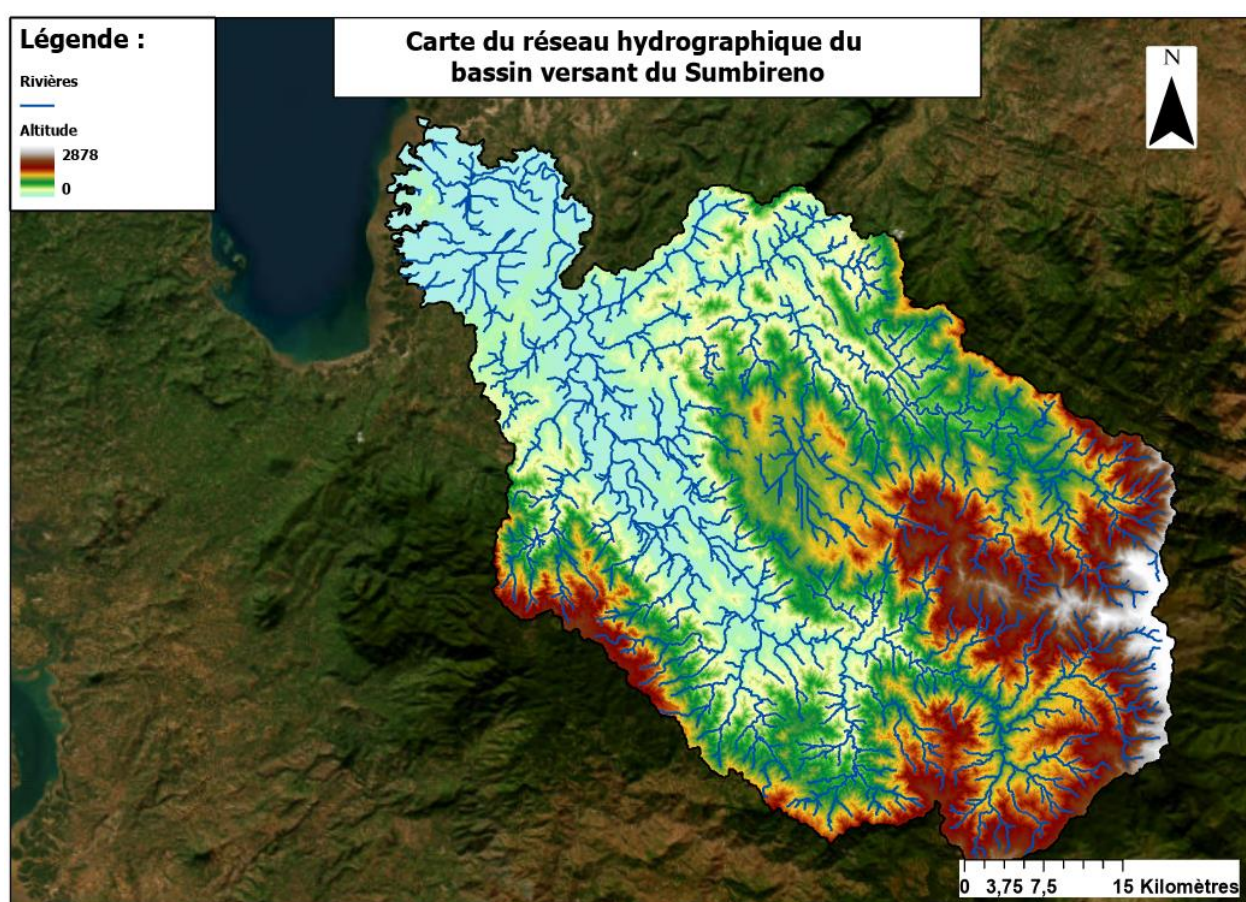


Analyse hydrologique des bassins versants du Nord de Madagascar

Certificat complémentaire en géomatique
Université de Genève



Rédigé par Grigis Mathieu

Août 2025

Résumé :

Aujourd'hui, la biodiversité mondiale traverse une crise majeure, considérée comme la sixième extinction de masse, dont Madagascar constitue un cas emblématique. L'île, riche d'un exceptionnel taux d'endémisme du fait de son isolation géographique, est à la fois un « hotspot » de biodiversité et une région soumise à de fortes pressions anthropiques, notamment la déforestation, responsable d'une perte importante d'habitats et d'espèces. Face à ces menaces, le pays a développé un réseau d'aires protégées qui montre des limites. Plus récemment, le concept d'infrastructure écologique (IE) suscite de l'intérêt puisqu'il permettrait de mieux concilier les objectifs de conservation et les besoins socio-économiques des populations locales. Cette approche repose sur la modélisation des milieux naturels afin de bâtir quatre piliers : la distribution des espèces, l'organisation spatiale du paysage et de ses composantes, la connectivité des milieux et enfin la prise en compte des services écosystémiques.

Ce projet de géomatique vise à cartographier les cours d'eau et les bassins versants du Nord de Madagascar, ainsi qu'à préparer les données nécessaires à l'évaluation de services écosystémiques, tels que l'accès à l'eau ou la séquestration du carbone, puisque ces données sont essentielles à l'élaboration d'une IE. La démarche repose principalement sur l'utilisation du logiciel InVEST (v. 3.15.0), conçu pour évaluer divers services écosystémiques. Ce processus s'appuie sur des données topographiques, climatiques et pédologiques majoritairement acquises par télédétection en raison du manque de relevés sur le terrain. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) Alos 3D World a été choisi pour sa résolution de 30 m et sa fiabilité, afin de calculer plusieurs indices topographiques et de réaliser l'analyse hydrologique. Une fois ce MNT reprojeté et corrigé, la modélisation a été effectuée avec les modèles « RouteDEM » et « DelineateIt », permettant respectivement d'identifier les rivières et de délimiter les bassins versants en utilisant l'algorithme D8. Plusieurs variantes des modèles ont été testées en faisant varier la résolution du MNT et le seuil d'accumulation pour distinguer différents niveaux de détail des réseaux hydrographiques et des bassins versants.

Le choix d'utiliser le MNT Alos 3D World a été validé par comparaison avec une carte topographique de référence, confirmant sa précision en vue de l'analyse hydrologique. La comparaison des indices topographiques, produits par le modèle « RouteDEM » et ArcGIS, confirme la fiabilité du modèle car les résultats sont très similaires, à l'exception de petites différences d'échelle et d'unités. L'identification des rivières montre une précision très satisfaisante en zones de relief, bien que réduite en plaine. Trois variantes du modèle ont permis d'ajuster la sensibilité de détection des cours d'eau pour avoir des résultats plus complets. Les bassins versants ont été délimités avec « DelineateIt » puis modifiés manuellement pour obtenir une cohérence avec les données de référence d'HydroSHEDS, mais avec une meilleure précision. Enfin, les données climatiques et pédologiques nécessaires au modèle « Seasonal Water Yield » ont été préparées, bien que son exécution n'ait pu être réalisée.

Table des matières

Résumé :	2
Présentation de l'organisme hôte	4
1. Introduction	5
1.1. Madagascar un « hotspot » de biodiversité	6
1.2. Origines de l'endémisme de Madagascar	6
1.3. Menaces sur la biodiversité	7
1.4. Stratégies de conservation	9
Objectifs du stage :	11
2. Approche théorique	12
2.1. Exploitation de données topographiques	12
2.2. Identification des rivières	13
2.3. Délimitation des bassins versants	14
2.4. Préparation de données climatiques et pédologiques	15
3. Matériel et méthodes	16
3.1. Préparation du MNT	16
3.2. Exploitation des données topographiques	18
3.3. Identification des rivières	18
3.4. Délimitation des bassins versants	20
3.5. Récoltes de données climatiques et pédologiques	23
4. Résultats	25
4.1. MNT et indices topographiques	25
4.2. Identification des rivières	27
4.3. Délimitation des bassins versants	30
4.4. Récoltes de données climatiques et pédologiques	33
5. Conclusion	34
6. Réflexions sur le déroulement du stage	35
7. Bibliographie	36
Annexes :	41

Présentation de l'organisme hôte

« Créé il y a 200 ans, les Conservatoire et Jardin botaniques de Genève (CJBG) sont une institution muséale permettant ainsi l'étude, l'archivage et la conservation d'espèces, principalement végétales. Les nombreux projets menés à différentes échelles (régionale, nationale et internationale) ont pour objectif de poursuivre cette vision de l'amélioration des connaissances à des fins de protection et conservation des espèces et milieux. Les CJBG offrent également aux visiteurs un espace de délasserment et de sensibilisation à l'environnement. Ainsi, la vision des CJBG s'articule autour de 5 axes : explorer (par le biais de projets de recherche scientifiques), conserver (les espèces vivantes dans le jardin et séchées en herbier), rechercher (évolution des connaissances), transmettre (les connaissances acquises) et protéger (par le biais des listes rouges par exemple). Les CJBG hébergent le laboratoire "plant systematics and biodiversity" du Département "Plant Science" de la Faculté des Sciences de l'Université de Genève dirigé par la Prof. Yamama Naciri. »

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, la biodiversité mondiale a connu un déclin alarmant, marqué par la disparition accélérée de nombreuses espèces animales et végétales. Cette érosion de la biodiversité est considérée par de nombreux scientifiques comme la 6^{ème} grande extinction de masse que la Terre ait connue (Barnosky et al., 2011). Celle-ci résulte principalement des activités humaines, telles que la déforestation, l'urbanisation, la pollution, la surexploitation des ressources naturelles et les effets du changement climatique. La perte de biodiversité menace non seulement l'équilibre des écosystèmes, mais aussi les services essentiels qu'ils rendent à l'humanité, comme la régulation du climat, la pollinisation des cultures ou encore la purification de l'eau (IPBES, 2019).

Face à cette crise profonde, la préservation de la biodiversité s'est progressivement imposée comme un enjeu majeur en s'inscrivant à l'agenda politique international à partir de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Depuis les années 1970, cela s'est principalement traduit par l'augmentation de la surface et du nombre d'aires protégées partout dans le monde avec divers modes de gestion (Milian et Rodary, 2010). À partir de 1990, l'approche par priorisation est développée par des scientifiques et des ONG. Elle vise à identifier les zones écologiquement importantes pour mieux cibler l'emplacement de futures aires protégées. Dans ce cadre, plusieurs méthodes furent développées, dont celle des « hotspots » proposée par Myers et al. (2000). Un hotspot est défini selon deux critères : il doit y avoir un taux d'endémisme supérieur à 0.5 % du nombre total d'espèces de plantes vasculaires de la biosphère (~1500) et le milieu doit être menacé (Milian et Rodary, 2010 ; Mittermeier et al., 2011). L'étude de Myers et al. (2000) a identifié 24 hotspots de biodiversité dans le monde, dont l'île de Madagascar (figure 1).

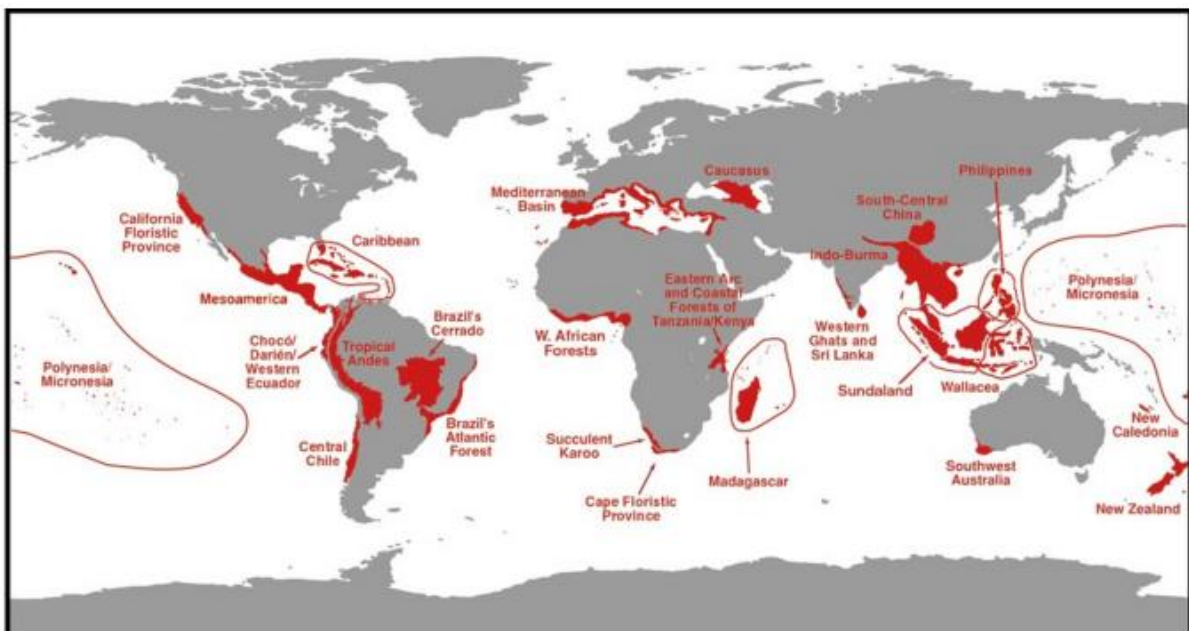


Figure 1 : Carte des 25 hotspots de biodiversité qui ont été identifiés en 2000 à l'échelle du globe. (Source : Myers et al., 2000.)

1.1. Madagascar un « hotspot » de biodiversité

L'île de Madagascar est située dans l'océan Indien au sud-est du continent africain avec lequel elle forme le canal du Mozambique. Il s'agit de la quatrième plus grande île du globe avec une superficie d'environ 587 000 km². Madagascar est considéré comme un des plus importants « hotspots » de biodiversité du fait que l'île abrite une grande proportion d'espèces endémiques et que ses milieux naturels subissent une forte pression liée aux activités humaines (Myers et al., 2000). D'une part, on estime qu'environ 90 % des espèces de vertébrés et 83 % des espèces de plantes vasculaires sont uniques de Madagascar (Callmander et al., 2011 ; Antonelli et al., 2022). De plus, l'étude d'Ondo et al. (2024) considère qu'une grande part de la diversité végétale de l'île demeure inconnue puisqu'il y aurait encore des centaines d'espèces non décrites dont la plupart ont très peu d'occurrences géographiques. D'autre part, à l'instar d'autres régions tropicales, cette biodiversité est principalement menacée par la déforestation de ses forêts tropicales humides. On considère que l'île a perdu environ 44 % de sa superficie de forêt primaire depuis 1953 et que 37 % de cette perte a eu lieu après 1973 (Vieilledent et al., 2018). Bien que ce phénomène ait connu un ralentissement ces dernières décennies, ce sont environ 99 000 hectares de forêt qui ont disparu entre 2005 et 2014. Les conséquences de la déforestation sont multiples puisqu'elle impacte négativement certains services écosystémiques comme le stockage du carbone ou la purification de l'eau (Brinck et al., 2017 ; IPBES, 2019). À cela s'ajoute la fragmentation et la diminution des habitats qui ont conduit à une perte d'environ 9 % de la biodiversité totale de l'île entre 1950 et 2000 (Allnutt et al., 2008).

1.2. Origines de l'endémisme de Madagascar

L'île de Madagascar est considérée comme étant la région du monde avec le plus haut taux d'endémisme. Cela s'explique principalement par deux facteurs : l'isolement géographique et la grande variabilité des conditions abiotiques (Ali and Aitchison, 2008 ; Antonelli et al., 2022). Dans l'histoire tectonique de la Terre, Madagascar n'a pas toujours été une île puisqu'il y a environ 170 millions d'années elle faisait partie intégrante du supercontinent du Gondwana (figure 2). Ensuite, ce grand continent s'est morcelé pour former l'actuelle Amérique du Sud, l'Afrique et l'Inde (figure 2). La naissance de l'île de Madagascar remonte à environ 88 millions d'années lorsque celle-ci s'est détachée de l'actuelle Inde et s'est progressivement rapprochée du continent africain (figure 2) (Ali and Aitchison, 2008). Cette isolation géographique de

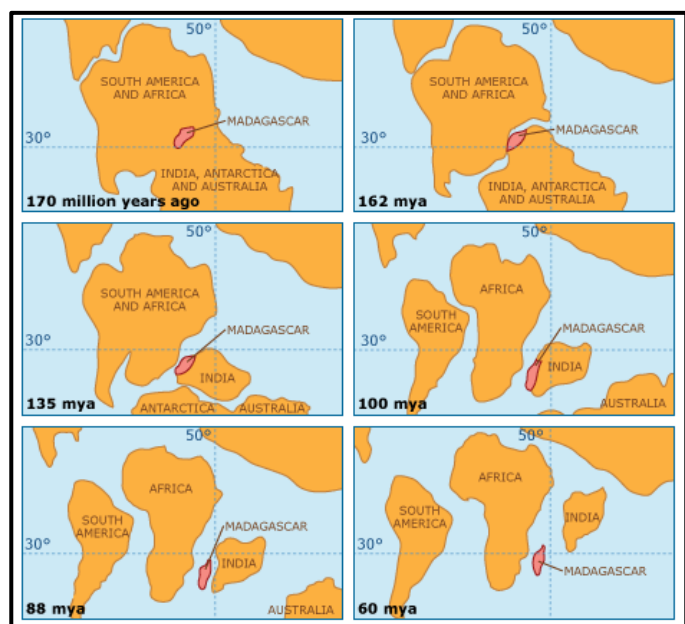


Figure 2 : Schéma de l'histoire tectonique de l'île de Madagascar. (Source : <https://evolution.berkeley.edu/evo-news/where-did-all-of-madagascars-species-come-from/>)

l'île de Madagascar causée par les mouvements tectoniques a contribué au phénomène de spéciation allopatrique. Depuis plusieurs dizaines de millions d'années, les espèces présentes sur l'île ont évolué différemment de leurs proches parents sur le continent, menant finalement à l'apparition de nouvelles espèces (Antonelli et al., 2022).

Au-delà de l'aspect tectonique, l'île de Madagascar abrite également une grande variété de biomes du fait de sa situation géographique, sa topographie, sa géologie et sa pédologie (figures 3 et 4) (Humbert, 1955 ; Antonelli et al., 2022). En effet, la côte est de l'île est relativement humide car elle bénéficie d'une importante pluviométrie provenant de l'océan Indien. Au centre, on y trouve plutôt des hauts plateaux et les principaux sommets de l'île avec des régions plus sèches et plus froides. Tandis que la partie ouest de l'île est sèche avec également des milieux arides, voire désertiques (figures 3 et 4) (Moat et Smith, 2007).

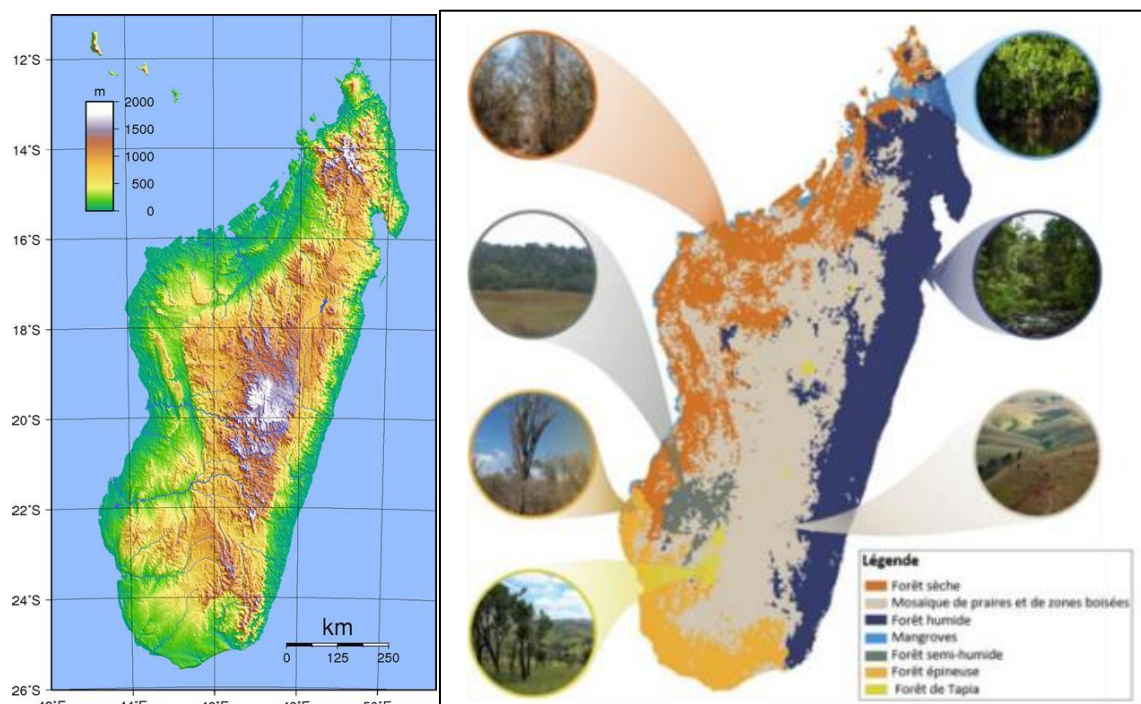


Figure 3 et 4 : À gauche, topographie de Madagascar (Source : vidiani.com). À droite, carte des différents types de couverture végétale sur l'île de Madagascar (Source : Moat et Smith 2007, adapté par Antonelli et al., 2022).

1.3. Menaces sur la biodiversité

D'après l'étude de Pierron et al. (2017), les premiers Hommes à avoir foulé la côte est de Madagascar, entre -3000 et -2000 ans avant J.-C., provenaient d'Indonésie, plus précisément de l'île de Bornéo. Plus tard, vers -1500 ans avant J.-C., une seconde population d'origine africaine (les Bantus) s'est établie au nord-ouest de l'île (Pierron et al., 2017) (Figure 5). Enfin, plusieurs populations issues des continents asiatique et européen viendront également s'installer sur l'île. Ces populations, avec des origines diverses, se sont progressivement mélangées, ce qui explique la diversité tant génétique que culturelle des habitants actuels de l'île (Pierron et al., 2017). Ces populations pionnières établies à Madagascar depuis plusieurs siècles, voir même plusieurs millénaires pour les plus anciennes, ont certainement induit une première phase de déforestation dans certaines régions pour les besoins de l'agriculture et de l'élevage. Cependant, il est

aujourd'hui très difficile de déterminer quels milieux ont été modifiés par l'activité humaine. D'ailleurs cette question suscite encore de vifs débats au sein de la communauté scientifique puisqu'il n'y a pas de données permettant d'y répondre clairement (Hansford et al., 2018 ; Anderson et al., 2022).

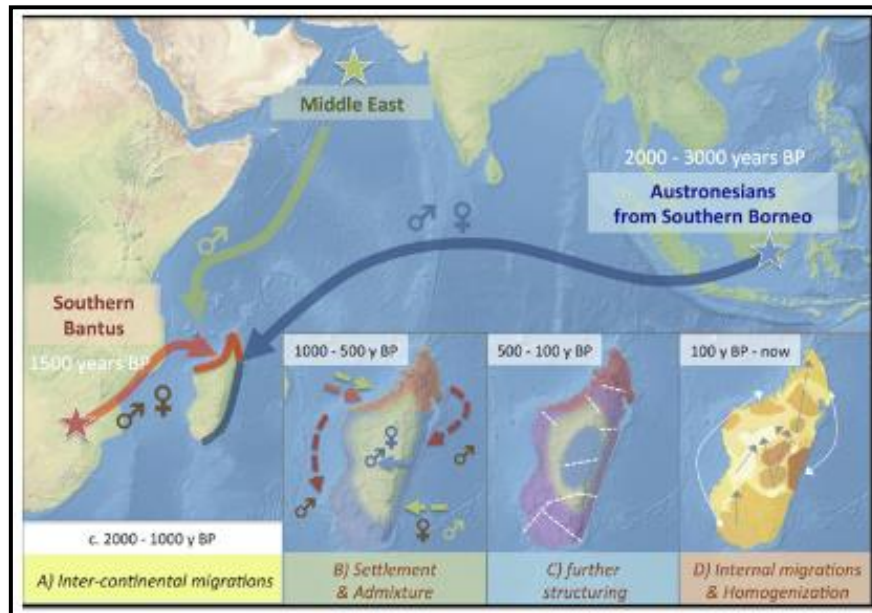


Figure 5 : Schéma des populations ayant colonisées Madagascar avec leur date d'arrivée estimée et leur région d'origine.
(Source : Pierron et al., 2017).

En revanche, on dispose de données plus concrètes de la couverture du sol, à partir du XX^{ème} siècle, qui permettent de suivre l'évolution de la surface forestière de l'île. Les travaux de Vieilledent et al. (2018) ont mis en évidence une perte de 44 % de celle-ci entre 1950 et 2014 (figure 6). La déforestation entraîne une diminution et une fragmentation des habitats forestiers indispensables pour de nombreuses espèces. La fragmentation est définie comme un processus durant lequel une large surface d'habitat connecté est transformée en de nombreux patches d'aires moindres, résultant en une isolation géographique progressive entre ces derniers (Fahrig, 2003). La déforestation est directement responsable de l'extinction de 9 % des espèces de l'île depuis 1950 (Allnutt et al., 2008). On considère que l'activité humaine est la principale cause de cette déforestation (Vieilledent et al., 2018). En effet, la croissance démographique de l'île induit des besoins croissants en nourriture et donc la forêt est progressivement rasée au profit de l'agriculture sur brûlis et de pâturages pour le bétail (Grinand et al., 2013, Vieilledent et al., 2018). De plus, l'importante pauvreté de la population est un facteur aggravant la déforestation, car la population s'approvisionne directement en bois dans la forêt pour cuisiner et construire ainsi que pour alimenter le marché noir d'essences forestières rares rapportant un complément de revenu (Carr et al., 2005 ; Salmona et al., 2017).

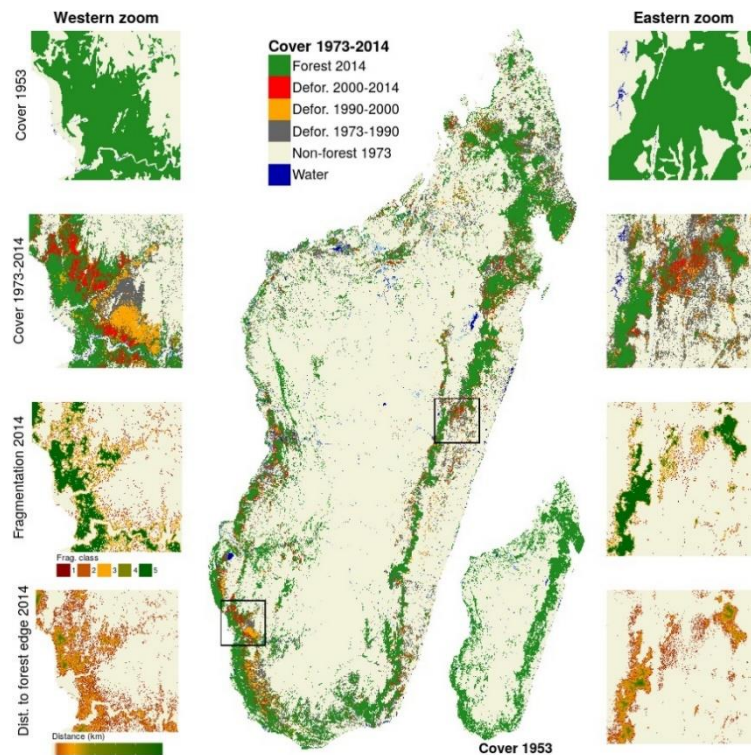


Figure 6 : Evolution de la couverture forestière de l'île de Madagascar entre 1950 et 2014. (Source : Vieilledent et al., 2018).

1.4. Stratégies de conservation

Depuis 1927, un réseau d'aires protégées (AP), couvrant environ 10 % du territoire, a été mis en place à Madagascar afin de protéger certaines zones forestières de la déforestation (Kull, 2014). Ensuite, il faut attendre 2003 pour que le gouvernement malgache décide de tripler le nombre d'AP en une dizaine d'années à la suite du congrès mondial des parcs à Durban. Cet objectif a été atteint en 2013 et le pays s'est alors engagé, lors de la conférence de Nagoya, à protéger 17 % de la superficie nationale d'ici à 2020, conformément à l'objectif C.11 d'Aichi (Ralimanana et al., 2022). À l'heure actuelle cet objectif n'est pas encore atteint mais les efforts de conservation sont maintenus. Il existe plusieurs types d'AP qui sont classées en différentes catégories : les réserves naturelles intégrales (RNI), les parcs nationaux (PN), les réserves spéciales, les réserves de biosphère. Selon leur mode de gestion, certaines AP permettent des usages multiples, dont l'exploitation de ressources naturelles par les populations locales (Dudley, 2008 ; Gardner et al., 2018). Ainsi plusieurs AP vont au-delà de simples mesures de protection, s'efforçant d'équilibrer la conservation de l'environnement, les besoins économiques des communautés locales et la lutte contre la pauvreté (Gardner et al., 2013).

Pendant longtemps, les aires protégées ont constitué la principale stratégie de conservation, mais le nouveau concept d'infrastructure écologique (IE), ou infrastructure verte, permet de mieux concilier les objectifs de conservation avec les besoins socio-économiques des populations locales. Cette approche facilite l'identification et la création d'un réseau interconnecté de zones naturelles et semi-naturelles pour mieux conserver et restaurer les écosystèmes (figure 7) (Benedict & McMahon, 2001).

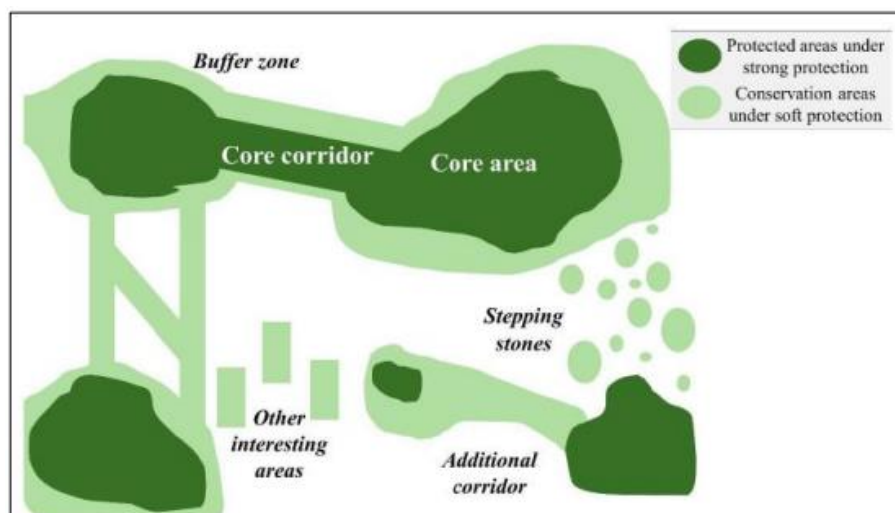


Figure 7 : Exemple d'IE théorique composé de zones centrales et de corridors bénéficiant d'une protection renforcée (vert foncé), ainsi que de zones supplémentaires de grand intérêt écologique utilisées pour relier les zones centrales ou servir de zones tampons (vert clair). Source : Honeck et al., 2020

Il existe actuellement plusieurs approches et méthodes pour élaborer et mettre en place une infrastructure écologique (Liquete et al., 2015 ; Verhagen et al., 2017 ; Honeck et al., 2020). L'approche retenue pour cette étude s'inspire de celle mise en œuvre pour l'IE du Grand Genève (Lehmann et al., 2023) et elle repose sur quatre piliers fondamentaux. Premièrement, la biodiversité englobe la diversité des espèces, des paysages ainsi que la diversité génétique. Deuxièmement, la structure de l'IE fait référence à l'organisation spatiale du paysage et de ses composantes. Cela souligne la nécessité de considérer les aires protégées comme faisant partie d'un réseau plus vaste, puisque plus il y a d'habitats naturels connectés dans un paysage, meilleure est sa structure. Troisièmement, il y a la connectivité fonctionnelle qui est la capacité réelle des espèces à se déplacer dans le paysage, celle-ci varie fortement selon les organismes considérés (Oliveira-Junior et al., 2020). Dernièrement, il y a la prise en compte des besoins des communautés locales via les services écosystémiques, tels que la régulation du climat, la purification de l'eau ou le stockage du carbone (Maes et al., 2016).

Le concept de service écosystémique est apparu dans les années 1970-80 (Westman, 1977). Initialement utilisé par les scientifiques, celui-ci a évolué et s'est démocratisé au fil du temps. Il n'existe pas de définition universelle, mais celle proposée par le Millennium Ecosystem Assessment (2005) est la plus courante : un service écosystémique est le bénéfice que les sociétés humaines tirent directement ou indirectement du fonctionnement des écosystèmes. Ces services comprennent les fonctions de production (nourriture, eau), de régulation (climat, qualité de l'air et de l'eau, pollinisation), de soutien (cycle des nutriments) et culturelles (valeurs spirituelles, récréatives ou esthétiques). Ils sont indispensables au bien-être humain et à la survie des sociétés. Plus récemment, l'IPBES a introduit le concept de Nature's Contributions to People (NCP) qui élargit celui de service écosystémique en intégrant non seulement les bénéfices matériels et immatériels de la nature, mais aussi la diversité des savoirs, valeurs culturelles et relations entre sociétés humaines et écosystèmes. Il vise ainsi à mieux refléter la pluralité des visions du monde et des systèmes de connaissance, notamment autochtones et locaux (Pascual et al., 2017).

Objectifs du stage :

- Produire plusieurs informations dérivées et indices à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), de scripts, etc. réalisés par Lena Hyvärinen en 2024 dans le cadre du stage de certificat complémentaire de géomatique.
- Utiliser les modèles du logiciel InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) pour géoréférencer les rivières, délimiter les bassins versants et comparer les résultats avec d'autres références.
- À l'aide du logiciel InVEST, évaluer les services écosystémiques des bassins versants selon la répartition des fragments forestiers, entre autres : sensibilité à l'érosion, approvisionnement en eau pour les populations locales, stockage carbone, etc.

2. Approche théorique

Ce projet de géomatique se focalise sur la génération d'indices topographiques, sur la cartographie des cours d'eau et bassins versants ainsi que sur la préparation des données nécessaires à l'évaluation de plusieurs services écosystémiques (accès à l'eau, stockage du carbone, érosion). Pour cela, le logiciel Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST, version 3.15.0) a été utilisé (Natural Capital Project, 2025). Les données produites à l'issue de ce travail seront utilisées pour la modélisation de l'infrastructure écologique du Nord de Madagascar. Il est à noter que celles-ci seront stockées sur le disque (U:) avec toutes celles issues des travaux précédents. De plus, une fiche technique sera rédigée afin de détailler le protocole développé dans ce rapport ainsi que pour indiquer le nom et les caractéristiques des données produites (scripts, rasters, vecteurs, etc.).

La zone d'étude couvrant le Nord de Madagascar est très étendue avec une superficie d'environ 100 000 km² soit deux fois et demie celle de la Suisse. De plus, de nombreuses régions sont difficiles d'accès, ce qui limite fortement la récolte de données de terrain (relevés topographiques, données météo). Dans ce contexte, la télédétection offre une bonne alternative pour obtenir des données en libre accès et précises dans ces zones sous-monitorées. Les analyses réalisées pour ce travail s'appuient majoritairement sur des données obtenues par télédétection : un modèle numérique de terrain (MNT), une carte de la couverture/occupation du sol et des données climatiques ainsi que pédologiques.

2.1. Exploitation de données topographiques

Un modèle numérique de terrain (MNT) couvrant le Nord de Madagascar a déjà été sélectionné en 2024 par la précédente stagiaire Léna Hyvarinen. Il s'agit du modèle Alos 3D World¹ obtenu à partir d'images panchromatiques (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping [PRISM]) du satellite Advanced Land Observing (ALOS, surnommé "Daichi") (Tadono et al., 2016). Ce MNT est construit à l'aide d'images stéréoscopiques capturées par satellite pour reconstituer la topographie du sol, il s'agit d'une méthode photogrammétrique. Le choix du MNT Alos 3D World s'explique par le fait qu'il possède une bonne résolution (30 m) et une bonne couverture globale tout en ayant moins d'erreurs et d'artefacts que d'autres MNT comme la carte numérique d'élévation ASTER Global (Global Digital Elevation Model)² ou celle de la mission topographique radar de la navette spatiale (Shuttle Radar Topography Mission)³ (Apeh et al., 2019 ; Abrams et al., 2020).

Un MNT est une représentation de la topographie du sol qui contient deux variables : une surface sous forme de pixels géoréférencés (coordonnées X et Y) et l'altitude de ce pixel (Z). Le choix de celui-ci est essentiel pour calculer des indices topographiques tels que l'indice de position topographique (TPI) ou l'indice d'humidité topographique (TWI), car ces derniers dépendent directement de la résolution et de la précision des altitudes (Beven et Kirkby, 1979 ;

¹ [Dataset | ALOS@EORC](#)

² [Carte numérique d'élévation ASTER Global](#)

³ <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Weiss, 2001) (figure 8). On utilise également les MNT dans plusieurs domaines, dont l'hydrologie, car ils permettent de représenter les réseaux hydriques et de délimiter les bassins versants. Ainsi, un MNT mal calibré, trop grossier ou contenant des erreurs (bruit, artefacts, valeurs aberrantes) peut fausser les résultats des calculs, entraînant des interprétations incorrectes. Le MNT Alos 3D Wolrd a permis de calculer plusieurs informations dérivées (pente, exposition, etc.) et indices topographiques : TPI, DAH et TWI (Beven et Kirkby, 1979 ; Weiss, 2001) (figure 8). Pour ce faire, plusieurs scripts Python ont préalablement été rédigés par Léna Hyvärinen. Ceux-ci ont été testés et modifiés, si nécessaire, afin qu'ils fonctionnent correctement (annexes 1 et 2).

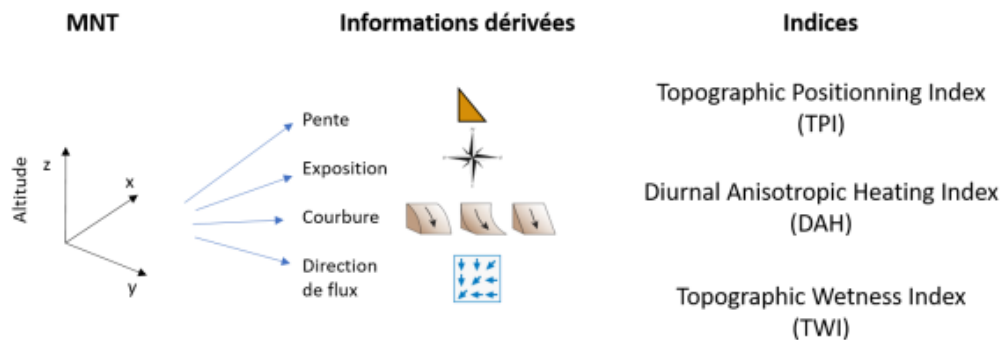


Figure 8 : Schéma des informations et des indices pouvant être calculés à partir d'un modèle numérique de terrain.

2.2. Identification des rivières

Ensuite, une analyse hydrologique par modélisation des flux a été réalisée afin de mettre en évidence l'ensemble des cours d'eau du Nord de Madagascar. Cette méthode consiste à appliquer l'algorithme de direction des flux D8 sur un MNT. Pour cela, celui-ci a d'abord été reprojété en coordonnées métriques, les valeurs manquantes (NoData) ont été corrigées, et les dépressions internes ont été comblées à l'aide d'un script Python afin d'assurer une continuité d'écoulement des eaux (annexe 3). L'algorithme D8 repose sur le principe de flux directionnel : pour chaque cellule du raster, il identifie l'une des huit cellules voisines (horizontalement, verticalement ou en diagonale) vers laquelle l'eau s'écoulera, en choisissant celle présentant la pente la plus forte (différence d'altitude maximale) (Gabrecht et Marz, 1997). Ainsi, il définit une direction de flux unique par cellule, ce qui permet de modéliser l'écoulement de l'eau sur l'ensemble du terrain. En accumulant le flux descendant de cellule en cellule, on obtient un réseau de drainage où les cellules recevant le plus de flux correspondent aux cours d'eau potentiels (figure 9). La dernière étape consiste à définir un seuil d'accumulation au-delà duquel les cellules sont considérées comme un cours d'eau (Gabrecht et Marz, 1997).

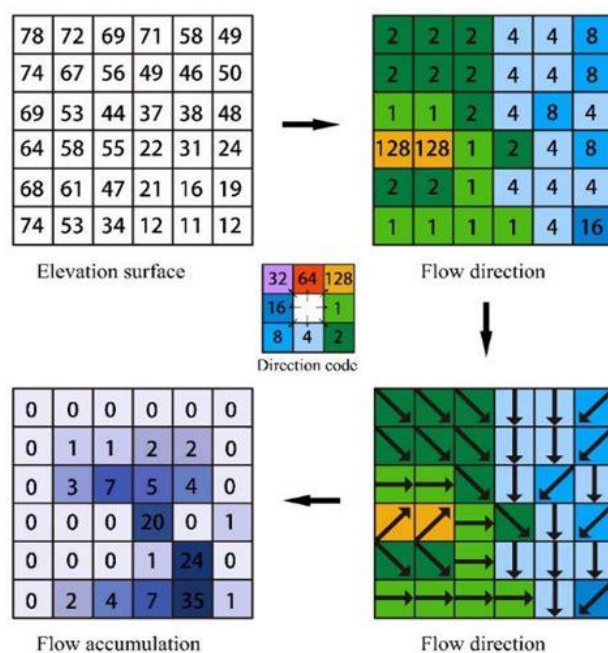


Figure 9 : Fonctionnement de l'algorithme D8 à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT). (Adapté de : <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>)

L'analyse hydrologique a été réalisée avec le logiciel « InVEST » puisqu'il est doté du modèle « RouteDEM » qui est spécifiquement conçu pour de telles analyses. Ce dernier utilise le même algorithme de direction des flux (D8) et il emploie les mêmes méthodes que dans ArcGIS Pro, mais de manière simplifiée et automatisée grâce à Python. À l'issue de l'exécution du modèle « RouteDEM », on obtient une couche raster binaire dans laquelle tous les pixels ayant une valeur de 1 sont des cours d'eau. Ce dernier peut également produire, de manière optionnelle, une couche vectorielle de l'ordre de Strahler, ou ordre d'écoulement, et une couche vectorielle des sous-bassins versants (subwatersheds) de chaque cours d'eau. L'ordre de Strahler est une méthode de classification hiérarchique des cours d'eau où un tronçon prend l'ordre 1 s'il n'a pas d'affluent, et augmente d'une unité uniquement lorsque deux cours d'eau de même ordre confluent (Strahler, 1952). Ces informations peuvent être utiles si l'on travaille à l'échelle d'un bassin versant pour distinguer le cours d'eau principal de ses affluents.

2.3. Délimitation des bassins versants

La seconde phase de l'analyse hydrologique consiste à délimiter les bassins versants, toujours à partir d'un MNT. Cette étape est réalisée à l'aide du modèle « DelineateIt » qui est spécifiquement conçu pour cela et directement intégré au logiciel InVEST. Celui-ci utilise également l'algorithme D8 pour calculer la direction d'écoulement à partir du MNT prétraité, puis génère automatiquement des bassins versants en fonction des points de sorties ou exutoires (Gabrecht et Marz, 1997). Il est à noter que ceux-ci peuvent être directement définis par l'utilisateur sous forme d'une couche de points ou ils peuvent être générés automatiquement par le modèle « DelineateIt ». Comme dans ArcGIS Pro, où chaque étape (remplissage des dépressions, calcul de direction et accumulation de flux, délimitation manuelle des points d'exutoire) peut être automatisée avec le ModelBuilder, « DelineateIt » regroupe l'ensemble de ces traitements en un seul processus automatisé avec un script Python (figure 10). Le choix

d'utiliser ce logiciel s'explique donc par sa simplicité d'utilisation et sa rapidité d'exécution comparée à une démarche plus complexe avec les outils d'ArcGIS Pro puisque le processus d'automatisation doit être préalablement construit puis testé. De plus, cela permet de s'assurer de la compatibilité et de la cohérence spatiale des données avec le réseau hydrographique extrait précédemment puisque toutes les étapes du processus s'effectuent sur le même logiciel. Le résultat final est une couche vectorielle représentant les limites de chaque bassin versant associé aux points d'écoulement identifiés sur le terrain.

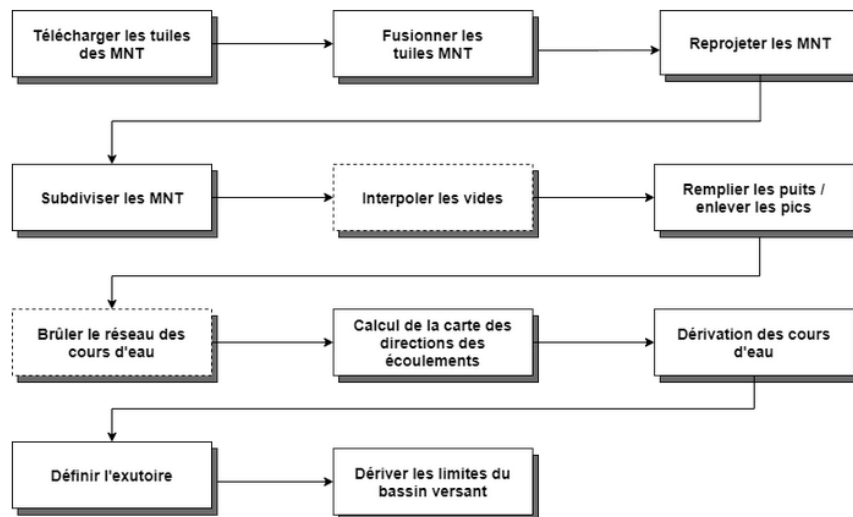


Figure 10 : Processus de traitement pour délimiter un bassin versant à partir d'un MNT sur ArcGIS Pro. (Source : [https://courses.gisopencourseware.org/pluginfile.php/467/mod_book/chapter/975/image%20\(1\).png](https://courses.gisopencourseware.org/pluginfile.php/467/mod_book/chapter/975/image%20(1).png))

2.4. Préparation de données climatiques et pédologiques

La finalité de ce travail est de rassembler et préparer l'ensemble des données nécessaires à l'évaluation de certains services écosystémiques, comme l'accès à l'eau potable ou la séquestration du carbone. En effet, la construction de l'infrastructure écologique requiert de connaître les besoins des communautés locales au travers de certains services écosystémiques (Honeck et al., 2020). Or, le logiciel InVEST a été conçu dans ce but puisqu'il contient une vingtaine de modèles permettant d'évaluer une multitude de services écosystémiques. Pour ce travail, on s'intéresse particulièrement au modèle « Seasonal Water Yield » qui permet d'évaluer l'accès à l'eau des communautés locales selon la période de l'année. Ce dernier requiert de nombreuses données pour pouvoir être exécuté et donc un important travail préparatoire est nécessaire. Tout d'abord, il faut représenter le réseau hydrographique de l'île afin de délimiter les bassins versants. Lors de l'utilisation du modèle « Seasonal Water Yield », il apparaît préférable de travailler à l'échelle d'un bassin versant plutôt qu'à celle de toute la zone d'étude afin de garantir des résultats plus fiables et de limiter le volume de données à traiter par le logiciel. Lorsque la délimitation des bassins versants est achevée, on procède à la préparation des données climatiques et pédologiques nécessaires au bon fonctionnement du modèle. La problématique est que l'on dispose d'un nombre très limité de données récoltées *in situ*. Il est donc nécessaire d'utiliser celles acquises par télédétection qui sont par conséquent moins précises car à une échelle plus globale.

3. Matériel et méthodes

3.1. Préparation du MNT

Après avoir importé le modèle numérique de terrain (MNT) Alos 3D World dans ArcGIS Pro, il a été nécessaire de réaliser quelques étapes préparatoires pour la suite du processus puisque de nombreuses couches raster doivent être produites sur la base du MNT (pente, TPI, TWI, cours d'eau, bassins versants, etc.). Du fait de son étendue, la zone d'étude est à cheval sur deux fuseaux UTM différents puisque deux tiers (partie gauche) sont dans l'UTM 39S et un tiers dans la zone UTM 38S (partie droite). Donc, si l'on utilise le système de coordonnées UTM 38S pour projeter le MNT, la partie de la couche se trouvant sur le fuseau UTM 39S est déformée et inversée. Cette déformation est problématique car les distances doivent être préservées pour garantir la précision des couches produites à partir du MNT.

Pour palier à ce problème, il a été décidé d'utiliser la projection cartographique conique conforme de Lambert (CCL). Cette projection se base sur deux parallèles standards, définis en fonction de la zone d'étude à couvrir, et elle est particulièrement adaptée pour projeter des zones étendues d'est en ouest comme c'est le cas ici (Snyder, 1993). Ce système de coordonnées nécessite de définir l'étendue en définissant un méridien central, une latitude d'origine et deux parallèles formant les limites nord-sud. La figure 11 illustre comment ont été définis les paramètres de la projection conique conforme de Lambert.

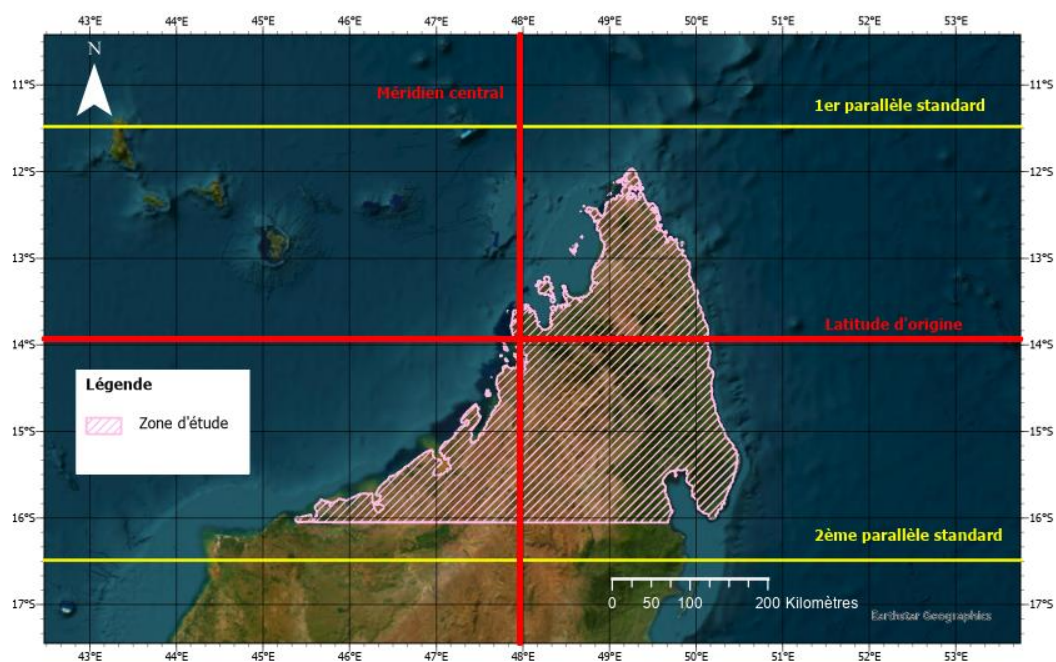


Figure 11 : Carte du Nord de Madagascar indiquant le positionnement du méridien central, de la latitude d'origine et des parallèles standards permettant de définir la zone d'étude.

La seconde étape préparatoire nécessite d'extraire les valeurs positives et nulles du raster avant de corriger les éventuels pixels ayant des valeurs NoData. Pour ce faire, Léna Hyvärinen a produit un script Python automatisant toutes ces étapes préparatoires et qui produit un MNT prêt pour la suite du processus de traitement. Cependant, le script original était prévu pour

projeter le raster d'entrée avec le système de coordonnées UTM 39S. Il a donc été modifié afin que le raster d'entrée soit projeté en utilisant le système de coordonnées CCL (annexe 3).

La dernière étape consiste à réduire l'emprise du MNT afin qu'il couvre uniquement la zone d'étude. En effet, ce dernier possède une étendue qui va bien au-delà des côtes de la partie nord de Madagascar. Or, ne pas réduire l'emprise du MNT induit des données plus lourdes à traiter, ce qui ralentit les processus de calcul. De plus, les zones du MNT sans relief ou au-dessus de la mer peuvent induire des résultats aberrants. Pour délimiter la zone d'étude, une couche vectorielle des limites administratives de Madagascar a été trouvée sur la plateforme [GADM.org](https://gadm.org)⁴ qui met à disposition des couches des limites administratives de tous les pays avec une haute résolution spatiale. Celle-ci a ensuite été importée, projetée dans le système de coordonnées CCL puis découpée afin de ne conserver que la partie nord de l'île. Pour ce faire, on crée une couche vectorielle qui contient un rectangle couvrant tout le Nord de l'île et dont les deux extrémités au Sud sont alignées sur la latitude 16° Sud. On utilise l'outil « Découper » et l'on ajoute en entrée notre couche des limites administratives de Madagascar avec le rectangle comme entité de découpage. Il en résulte une couche vectorielle des limites administratives du Nord de l'île de Madagascar au-delà de la latitude 16°S. Cette nouvelle couche s'appelle **NMada_Lim**. Elle sera stockée sous ce nom dans le dossier final contenant l'ensemble des couches (voir fiche technique).

Après une analyse visuelle de cette dernière, certaines régions côtières demeuraient trop grossièrement délimitées, donc une modification manuelle de ces zones a été réalisée. L'objectif était de mieux mettre en évidence les estuaires ou deltas des grands fleuves ainsi que les zones de mangroves, très présentes sur la côte nord-ouest de l'île. Il est important de délimiter le plus précisément possible les contours du MNT utilisé pour générer les cours d'eau et les bassins versants afin de garantir des résultats cohérents (figure 12 et 13). Pour cela, l'outil « Modifier les sommets » dans l'interface de modification d'une entité a été utilisé. Afin d'être plus précis lors du processus de modifications des contours de **NMada_Lim**, deux couches de référence ont été utilisées :

- La basemap (**World Imagery**) fournie par Esri qui permet d'avoir des images aériennes de la zone d'étude avec une précision d'environ 10-15 m selon la région du globe,
- La couche raster de couverture et d'occupation du sol (**LULC ESA World Cover**)⁵ fournie par l'Agence spatiale européenne qui utilise des données satellitaires issues de Sentinel-1 et Sentinel-2 avec une résolution de 10 m par pixel (annexe 4) (Zanaga et al., 2022).

⁴ [GADM](https://gadm.org)

⁵ [WorldCover | WORLDCOVER](https://worldcover.esa.int/)



Figures 12 et 13 : À gauche, image aérienne avec les limites côtières initiales (en turquoise). À droite, image aérienne avec les limites côtières modifiées (en turquoise).

Le processus de modification de la couche **NMada_Lim** a été réalisé manuellement et il a nécessité plus d'une semaine de travail afin d'obtenir des contours plus précis. Celle-ci est utilisée comme masque pour le découpage de toutes les futures couches utilisées dans le projet. Le MNT Alos 3D World, une fois découpé avec la couche **NMada_Lim**, a été renommé : **MNT_NMada_C**.

3.2. Exploitation des données topographiques

Une fois le MNT correctement préparé, plusieurs couches dérivées et indices topographiques ont été calculés à l'aide des deux scripts Python rédigés par Léna Hyvärinen (annexes 1 et 2). Le premier script permet de produire plusieurs couches raster ayant des informations liées à l'hydrologie :

- La pente (en degrés et en radians),
- Diurnal Anisotropic Heating index (DAH),
- Topographic Wetness Index (TWI) (Beven et Kirkby, 1979),
- Flow Direction (avec l'algorithme D8),
- Flow accumulation (avec l'algorithme D8)

Le second script permet de calculer plusieurs couches raster avec l'indice TPI (Topographic Positioning Index) en employant deux méthodes statistiques (moyenne et écart-type) et en faisant varier l'emprise avec l'outil « Statistiques focales » (Weiss, 2001). L'ensemble des couches rasters produites possèdent le préfixe **NMada_MNT** suivi du nom de l'indice.

3.3. Identification des rivières

L'analyse hydrologique par modélisation des flux a donc été réalisée à l'aide du modèle « RouteDEM » du logiciel « InVEST » (v. 3.15.0). Pour exécuter celui-ci, il suffit de lui fournir le MNT préalablement préparé, de définir la surface contributive minimale en pixels (Threshold Flow Accumulation) permettant de générer un cours d'eau et de choisir quelles couches optionnelles on souhaite (figure 14). Une fois la configuration terminée, on peut exécuter le

modèle dont le temps de calcul varie de quelques heures à plus d'une journée selon la taille du MNT utilisé en entrée (emprise et résolution).

Workspace (directory)	P:\Madagascar\Projet\InVEST 2\Riv_1000
File Suffix (text, optional)	Riv_1000
Digital Elevation Model (raster)	P:\Madagascar\Projet\Rasters_indices_DEM\MNT_NMada_C.tif
Band Index (number, optional)	number
Calculate Slope (optional)	<input checked="" type="checkbox"/>
Routing Algorithm	D8
Calculate Flow Direction (optional)	<input checked="" type="checkbox"/>
Calculate Flow Accumulation (optional)	<input checked="" type="checkbox"/>
Calculate Streams (optional)	<input checked="" type="checkbox"/>
Threshold Flow Accumulation (number) (number of pixels)	1000
Calculate Distance To Stream (optional)	<input type="checkbox"/>
Calculate Strahler Stream Orders (D8 Only) (optional)	<input checked="" type="checkbox"/>

Figure 14 : Interface du modèle "RouteDEM" dans le logiciel InVEST.

Plusieurs répétitions du modèle ont été effectuées avec des configurations différentes : le seuil d'accumulation (Treshold Flow Accumulation) et la résolution du MNT en entrée. La modification du seuil d'accumulation permet d'augmenter ou de réduire la surface contributive et donc la sensibilité de détection des cours d'eau. Plus la surface contributive est faible et plus le modèle détectera de petits cours d'eau, et inversement. Cela peut permettre de distinguer les cours d'eau permanents et temporaires entre eux. Augmenter la résolution par pixels du MNT, de 30 m à 10 m, a pour but d'augmenter la sensibilité du modèle aux variations d'altitudes dans les zones avec très peu de relief comme dans la partie ouest de la zone d'étude. En effet, dans les zones de plaines, l'algorithme D8 montre des limites pour modéliser les cours d'eau à cause du manque de reliefs (Gabrecht et Marz, 1997 ; Zhang et al., 2014). C'est l'outil « rééchantillonner » qui a permis d'augmenter la résolution du MNT de 30 m à 10 m par pixel. Finalement, trois couches des rivières du Nord de Madagascar ont été réalisées selon plusieurs paramètres, elles seront plus amplement analysées dans la partie résultat :

- **NMada_Riv_1000** (résolution du MNT : 30 m et seuil d'accumulation : 1000 pixels),
- **NMada_Riv_300_C** (résolution du MNT : 10 m et seuil d'accumulation : 300 pixels),
- **NMada_Riv_2000_C** (résolution du MNT : 10 m et seuil d'accumulation : 2000 pixels)

La dernière étape du processus consiste à transformer la couche des cours d'eau du format raster vers le format vectoriel. En effet, le modèle produit une couche raster binaire dans laquelle tous les pixels ayant une valeur de 1 sont considérés comme une rivière. À l'aide de l'outil « raster vers polyligne », on convertit ces pixels en lignes continues qui représentent les cours d'eau. Le format vectoriel permet d'effectuer des calculs de la longueur totale des polygones, via la table attributaire, pour mieux comparer les résultats entre eux.

3.4. Délimitation des bassins versants

La seconde phase de l'analyse hydrologique par modélisation des flux consiste à délimiter les principaux bassins versants de la zone d'étude avec le modèle « DelineateIt ». Ce dernier a besoin qu'on lui fournisse un MNT ainsi que des points de sorties (outlets), ou exutoires, pour effectuer la délimitation des bassins versants (figure 15). Le MNT utilisé en entrée est le même que dans le précédent modèle. Les points de sorties peuvent être fournis par le biais d'une couche vectorielle de points ou bien le modèle peut les détecter lui-même comme c'est le cas ici (figure 14). La première option est plus pertinente si l'on dispose d'une couche vectorielle des exutoires avec une bonne précision. La plateforme HydroSHEDS.org met gratuitement à disposition une base de données des bassins versants des principaux fleuves d'Afrique, dont Madagascar, qui contient une couche des exutoires. Cependant, cette dernière possède une portée trop globale et une mauvaise précision, environ 500 mètres, pour obtenir des résultats pertinents (Lehner & Grill, 2013). Pour cette raison, il a été décidé d'utiliser la seconde option en laissant le modèle déterminer lui-même les exutoires, puisque construire manuellement une couche des points de sorties aurait nécessité beaucoup de temps pour un résultat incertain. Enfin, il y a deux autres paramètres à renseigner avant l'exécution du modèle qui sont : le seuil d'accumulation (Treshold Flow Accumulation) et la distance de rattachement (snap distance) d'une rivière à l'exutoire le plus proche (figure 14). Le choix a été fait de définir une surface contributive de 1000 pixels car il n'est pas nécessaire de mettre en évidence l'ensemble des cours d'eau mais uniquement les principaux fleuves. La distance de rattachement a été fixée à 10 pixels, ce qui permet au modèle de lier une rivière à l'exutoire le plus proche, dans un rayon de 100 mètres, afin de gommer d'éventuelles incohérences spatiales.

DelineateIt x	
Workspace (directory)	P:\Madagascar\Projet\InVEST 2\BV_1000
File Suffix (text, optional)	BV_1000
Digital Elevation Model (raster)	P:\Madagascar\Projet\Rasters_indices_DEM\MNT_NMada_C.tif
Detect Pour Points (optional)	<input checked="" type="checkbox"/>
Watershed Outlets (vector)	vector
Skip Invalid Geometries (optional)	<input type="checkbox"/>
Snap Points To The Nearest Stream (optional)	<input checked="" type="checkbox"/>
Threshold Flow Accumulation (number) (number of pixels)	1000
Snap Distance (number) (number of pixels)	10

Figure 15 : Interface du modèle "DelineateIt" dans le logiciel InVEST.

Plusieurs répétitions du modèle ont été effectuées en modifiant les paramètres. Cependant, les résultats demeurent très similaires, ce qui suggère que le seuil d'accumulation et la distance de

rattachement exercent une influence limitée. Le modèle crée une couche vectorielle (**Watershed_1000**) dans laquelle chaque polygone est un bassin versant, mais après analyse des résultats il apparaît nécessaire de la retravailler à cause de plusieurs problèmes. Premièrement, la couche contient un nombre de bassins versants très élevé puisqu'il y en a environ 160 000 avec des superficies variant de quelques centaines de mètres carrés à plusieurs millions. Deuxièmement, de nombreux polygones se superposent parfaitement, ce qui complique les analyses. Enfin, certains polygones sont multiparties et peuvent n'avoir aucune continuité avec les autres polygones. Ces problèmes qui compliquent le traitement des données ont plusieurs causes : l'absence d'une couche des points de sortie (outlets) en entrée et le nombre très élevé de rivières identifiées dans la zone d'étude puisqu'elle couvre une grande superficie. Cependant, le manque de relief dans certaines régions, comme la côte ouest, constitue la plus grosse limite de l'algorithme D8, comme déjà évoqué précédemment (Zhang et al., 2014). En effet, dans certaines zones côtières, énormément de petits polygones, de quelques centaines de m² de superficie, sont générés de manière abusive par le modèle (figure 16). Donc le choix a été fait de travailler à l'échelle des bassins versants des principaux fleuves du nord de Madagascar dans l'optique de l'analyse des services écosystémiques. L'ensemble des petits bassins versants vont être fusionnés afin de créer des entités plus importantes. Pour réaliser cette étape, une couche de référence des bassins versants du nord de Madagascar issue de la base de données d'HydroSHEDS.org a été importée puis utilisée comme modèle de taille des entités (**hybas_af_lev07_v1c**). Il est à noter que cette base de données contient plusieurs couches d'entités des bassins versants avec plusieurs niveaux de détails allant de 1 (général) à 12 (très détaillé). Dans ce cas c'est la couche n°7 qui a été retenue (figure 17) (Lehner & Grill, 2013).

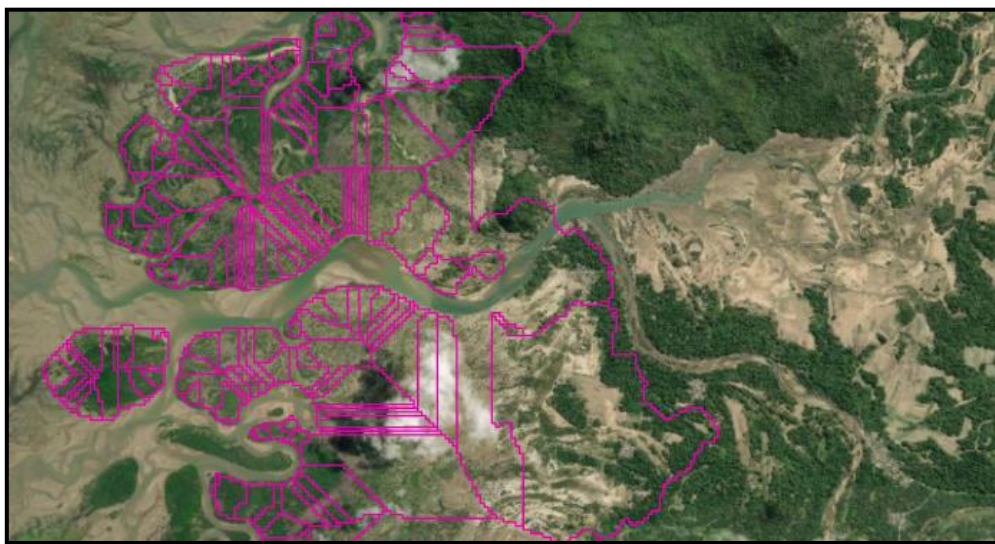


Figure 16 : Image aérienne des petits bassins versants (polygones roses) déterminés par le modèle "DelineateIt" dans un estuaire au nord-ouest de Madagascar.

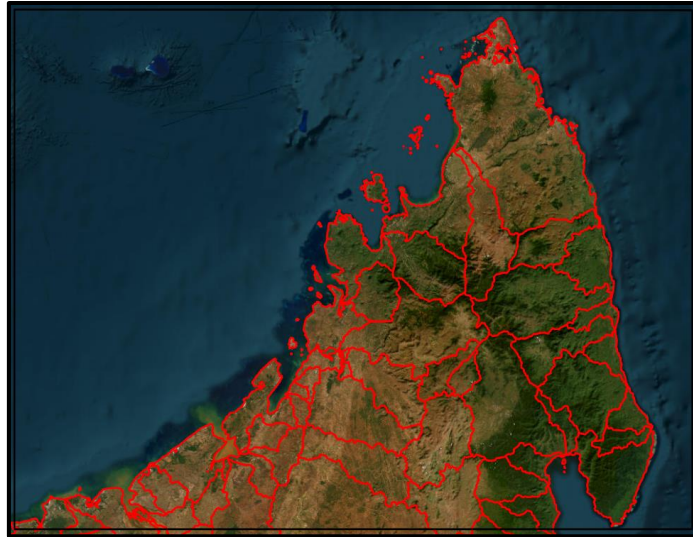


Figure 17 : Limites des principaux bassins versants (en rouge) du nord de l'île de Madagascar. (Source : Lehner & Grill, 2013 via HydroSHEDS.org).

La couche des bassins versants (**Watershed_1000**) a été importée dans ArcGIS Pro afin de pouvoir réaliser les corrections nécessaires. Initialement, les outils « Éliminer » et « Multiparties vers une partie » devaient être utilisés. Le premier permet d'éliminer plusieurs polygones selon un critère de sélection, comme la superficie, en les fusionnant à la plus grande entité à proximité. Le second permet de diviser un polygone multi-parties en plusieurs polygones distincts. Cependant, aucun de ces outils n'a pu fonctionner correctement à cause de l'erreur « Invalid Topology » lors du traitement de la couche **Watershed_1000**. Celle-ci survient généralement lorsque des polygones présentent des géométries corrompues, telles que des auto-intersections, des trous non valides, ou des anneaux mal fermés, empêchant l'exécution de ces outils. Malgré l'utilisation de l'outil « Réparer les géométries », le problème n'a pas pu être résolu car ce dernier ne parvenait pas à identifier et corriger des erreurs. Pour contourner ce problème, les outils « Combiner », « Modifier les sommets » et « Éclater » dans l'interface de modification d'une entité ont été utilisés. Ils permettent de réaliser manuellement les mêmes opérations que les outils cités précédemment tout en conservant les superficies et les périmètres des polygones. Pour réaliser ce processus, trois couches de référence ont été utilisées afin de correctement délimiter les bassins versants :

- La basemap (**World Imagery**) fournie par Esri qui permet d'avoir des images aériennes de la zone d'étude,
- La couche raster de couverture et d'occupation du sol (**LULC ESA World Cover**) fournie par l'agence spatiale européenne qui indique les pixels étant de l'eau ou de la mangrove (annexe 4),
- La couche des bassins versants (**hybas_af_lev07_v1c**)⁶ issue d'HydroSHEDS.org indique les limites des bassins versants.

⁶ [HydroBASINS](https://hydrobasins.org/)

Ce processus de traitement de la couche **Watershed_1000** a nécessité environ deux semaines de travail car l'ensemble des opérations sont réalisées manuellement et la zone d'étude à couvrir est très vaste. Les figures 16 et 18 permettent de rendre compte respectivement de l'avant et de l'après-traitement de la couche des bassins versants. La couche finale est : **Watershed_1000C**.

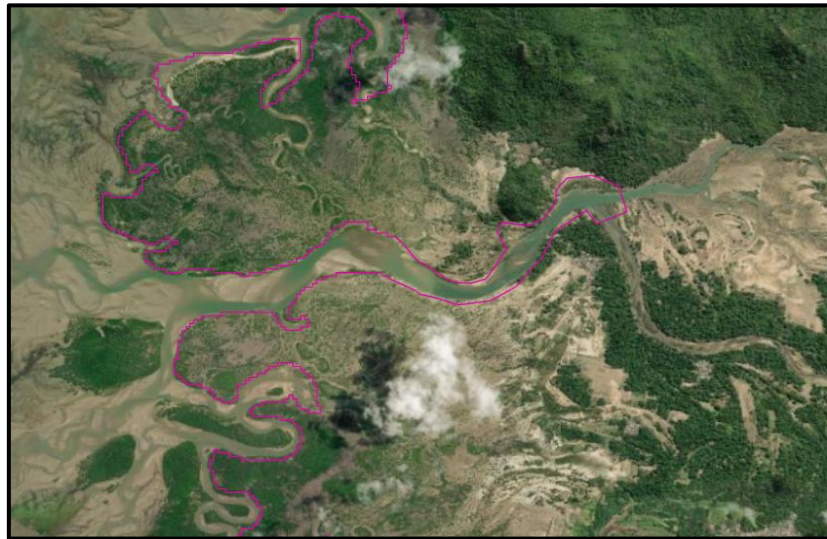


Figure 18: Image aérienne après fusion en un seul bassin versant (polygone rose) et modification du contour des côtes dans un estuaire du Nord-Ouest de Madagascar.

3.5. Récoltes de données climatiques et pédologiques

Le tableau 1 liste l'ensemble des données requises, avec quelques informations supplémentaires, pour l'exécution du modèle « Seasonal Water Yield » (Hamel et al., 2020) :

Tableau 1 : Liste des données nécessaires au modèle avec leurs informations respectives. Les tables (en rouge) n'ont pas encore été réalisées.

Nom de la couche	Format	Résolution/ Précision	Description	Source	Lien téléchargement
Alos 3D Wolrd	Raster	30 m	Modèle Numérique de Terrain	Tadono et al., 2016	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS
Bassin Versant	Vecteur	~ 30 m	Couche d'entités des bassins versants du nord de Madagascar	-	-
ESA Wolrd Cover	Raster	10 m	Raster de l'occupation du sol	Zanaga et al., 2022	https://esa-worldcover.org/en
Table biophysique	CSV	-	Attribut un code, un coefficient Kc et un CN à chaque classe d'occupation du sol	-	-
CHELSA_pet_pennmann	Raster	1 km	Evapotranspiration mensuelle de référence entre 1981-2010	Karger et al., 2018	https://chelsa-climate.org/
CHELSA_pr	Raster	1 km	Précipitations mensuelles de référence entre 1981-2010	Karger et al., 2018	https://chelsa-climate.org/

HYSOGs250m	Raster	250 m	Groupes hydrologiques de sols (perméabilité)	Ross et al., 2018	-
CHELSEA_kg2	Raster	1 km	Zones climatiques d'après la classification de Köppen Geiger	Karger et al., 2018	https://chelsea-climate.org/
Table des zones climatiques	CSV	-	Table du nombre mensuel de précipitations pour chaque zone climatique	-	-

L'ensemble de ces données ont été téléchargées et rassemblées dans un dossier commun (voir fiche technique) en vue de leur utilisation. Quelques étapes préparatoires sur ces dernières sont nécessaires pour garantir le bon fonctionnement du modèle, à l'exception des couches : **Alos 3D World**, **Bassin Versant** et **ESA World Cover** qui sont déjà prêtes. Les rasters CHELSA et HYSOG utilisent par défaut le système de coordonnées géographiques WGS_1984 (Karger et al., 2017 ; Ross et al., 2018). Il faut donc définir un système de coordonnées projetées qui doit être le même que le MNT, il s'agit de la projection conique conforme de Lambert (CCL). Enfin, la dernière étape préparatoire consiste à découper tous les rasters en utilisant la couche d'entités des bassins versants comme masque. En effet, pour des raisons pratiques, il est préférable de travailler à l'échelle d'un bassin versant à la fois, donc l'emprise du modèle doit être préalablement définie. Lorsque ces étapes sont réalisées, ce dernier peut être exécuté. Un protocole détaillé de la marche à suivre sera rédigé afin d'aider les prochains stagiaires travaillant sur l'évaluation des services écosystémiques du Nord de Madagascar.

Il est à noter que les deux tableaux, en format CSV, doivent être réalisés manuellement à partir de données supplémentaires. La table biophysique doit contenir plusieurs informations en lien avec la couche d'occupation du sol d'ESA World Cover. Pour chaque classe d'occupation du sol, il faut fournir une valeur unique d'identification (lucode), le coefficient cultural mensuel (Kc) et la perméabilité des différentes classes de sols (CN). La valeur lucode s'obtient en copiant celle qui est attribuée à chacune des classes dans la couche ESA World Cover. Le coefficient cultural (Kc), en lien avec la notion d'évapotranspiration, peut être estimé en utilisant les valeurs fournies par la documentation InVEST, pour certaines classes comme l'eau ou le bâti, ainsi qu'avec le guide n° 56 d'irrigation et de drainage de la FAO, pour la végétation (Allen et al., 1998). Enfin les valeurs de perméabilité (CN) peuvent être estimées en utilisant le manuel technique TR-55 du NRCS, anciennement USDA (USDA-SCS, 1986). Quant à elle, la table des zones climatiques doit compléter le raster des zones climatiques en indiquant le nombre de fois où il pleut dans chaque zone climatique pour chaque mois de l'année. Cette dernière information est plus difficile à obtenir puisqu'il y a trop peu de stations météorologiques dans le nord de Madagascar pour avoir des données fiables, comme le soulignent Hijmans et al. (2005). Il sera donc nécessaire d'extrapoler cette information à partir des rasters des précipitations journalières de la base de données CHELSA. Il est également possible de se baser sur la base de données CHIRPS-2.0 qui contient aussi des rasters des cumuls de précipitations journalières (Randriatsara et al., 2022).

4. Résultats

4.1. MNT et indices topographiques

Le MNT Alos 3D World a été préparé et projeté dans le système de coordonnées CCL, à l'aide d'un script Python (annexe 3). Ce changement de coordonnées projetées d'UTM 38S, ou 39S, vers CCL n'altère pas la précision du MNT puisque l'on conserve les distances en utilisant le même système de coordonnées géographiques : WGS_1984. Toutefois, pour s'assurer de la précision du MNT utilisé dans ce travail, une comparaison visuelle avec une carte topographique de référence a été effectuée. Pour cela, une couche vectorielle a été créée en extrayant les courbes de niveau (à 25 m) du MNT. Celles-ci sont ensuite superposées avec celles d'une carte topographique pour évaluer les différences. Comme le montre la figure 19, ci-dessous, on remarque que les courbes se suivent et se superposent, ce qui témoigne de la bonne précision du MNT. Donc ce dernier peut être utilisé comme base pour générer les rivières et identifier les bassins versants.

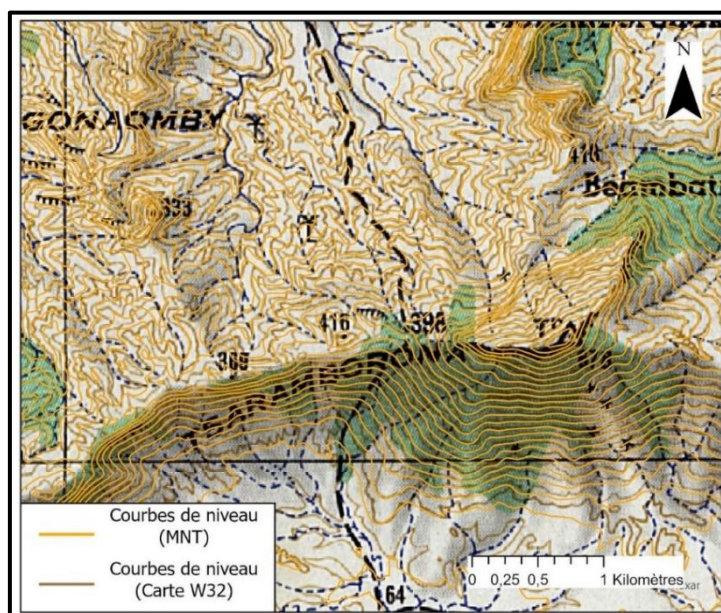


Figure 19 : Comparaison des courbes de niveau de la carte topographique et de celles issues du MNT Alos 3D World dans la région d'Antanambao.

Avant de procéder à l'identification des rivières, le MNT a été utilisé pour calculer plusieurs indices topographiques à l'aide de deux scripts Python rédigés par Léna (annexes 1 et 2). La pertinence de ces couches a déjà été évaluée précédemment, donc il n'est pas nécessaire de le refaire dans le cadre de ce projet (Hyvärinen, 2024). Il est à noter que le système de coordonnées projetées des couches en sortie a été modifié d'UTM 38S, ou 39S, vers CCL. Initialement, ces scripts ont été rédigés afin de réaliser l'analyse hydrographique avec ArcGIS Pro mais finalement le choix a été fait d'utiliser le logiciel InVEST. Or, le modèle « RouteDEM » utilisé pour l'identification des cours d'eau produit également, sur demande, des couches raster dérivées du MNT d'entrée : la pente, la direction des flux et l'accumulation des flux. Deux de ces couches vont être comparées à celles produites avec les scripts Python afin de comparer les fonctionnements respectifs des scripts. On s'attend à ce qu'elles soient très similaires puisque

les deux méthodes utilisent le même processus de calcul avec l'algorithme D8 pour produire les couches de direction et d'accumulation des flux (figures 20 et 21).

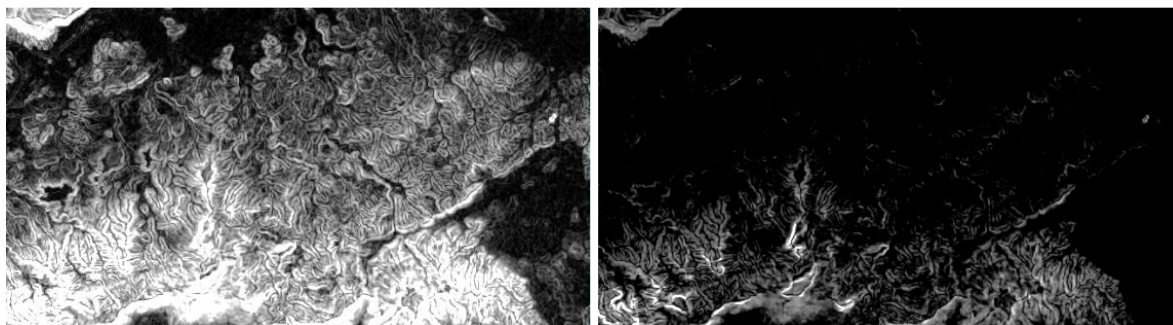


Figure 20 : Comparaison des rasters de la pente dans la région d'Antanambao. À gauche, la couche produite par le script Python dans ArcGIS et à droite celle produite par le modèle « RouteDEM » dans InVEST.

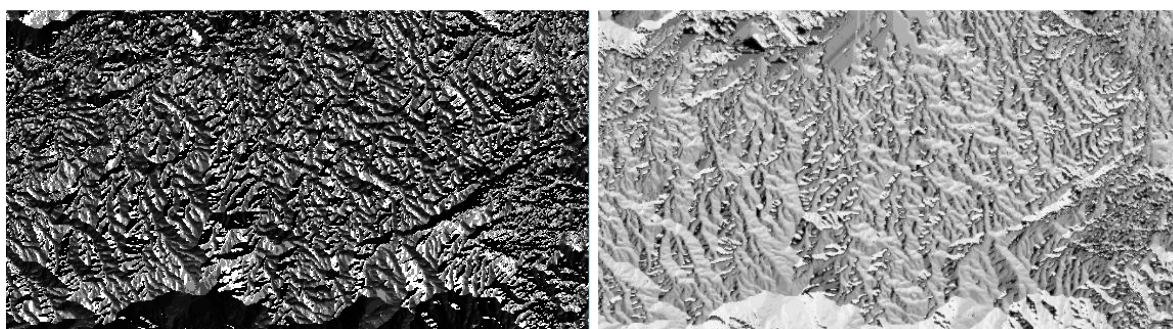


Figure 21 : Comparaison des rasters de la direction des flux (D8) dans la région d'Antanambao. À gauche, la couche produite par le script Python dans ArcGIS et à droite celle produite par le modèle « RouteDEM » dans InVEST.

La comparaison visuelle des rasters de la pente montre une grande similitude puisqu'on observe les mêmes formes de reliefs dans la région d'Antanambao (annexe 4). Toutefois, la couche produite par InVEST est beaucoup plus sombre et cela s'explique par une différence d'unité et d'échelle (figure 20). En effet, le script Python calcule la pente en degrés, donc les unités de la couche produite sur ArcGIS sont comprises entre 0° et 90°. Le modèle « RouteDEM » utilise également la pente en degrés mais il calcule la tangente de l'angle (en degrés) puis il multiplie le résultat par 100 pour obtenir un pourcentage. Ainsi, les deux rasters possèdent la même valeur de pente maximale qui est de 86,59 degrés avec une différence d'affichage de la symbologie liée aux unités.

La seconde comparaison s'intéresse aux rasters de direction des flux (figure 21). Les deux couches sont similaires puisque les mêmes reliefs sont mis en évidence malgré une différence visible de symbologie. En effet, les 8 directions possibles d'un flux hydrique sont codées avec des valeurs différentes entre les deux couches bien que l'on utilise le même algorithme (D8). Dans le raster issu d'ArcGIS, les 8 directions sont codées dans des valeurs entières comprises entre 0 et 255 (figure 20) tandis que dans le raster issu d'InVEST elles sont codées avec des valeurs entières comprises entre 0 et 7. Malgré des valeurs différentes attribuées à chaque direction, les deux rasters fournissent la même information. Ces résultats témoignent de la fiabilité des résultats produits par le logiciel InVEST par rapport à l'approche traditionnelle sur ArcGIS Pro.

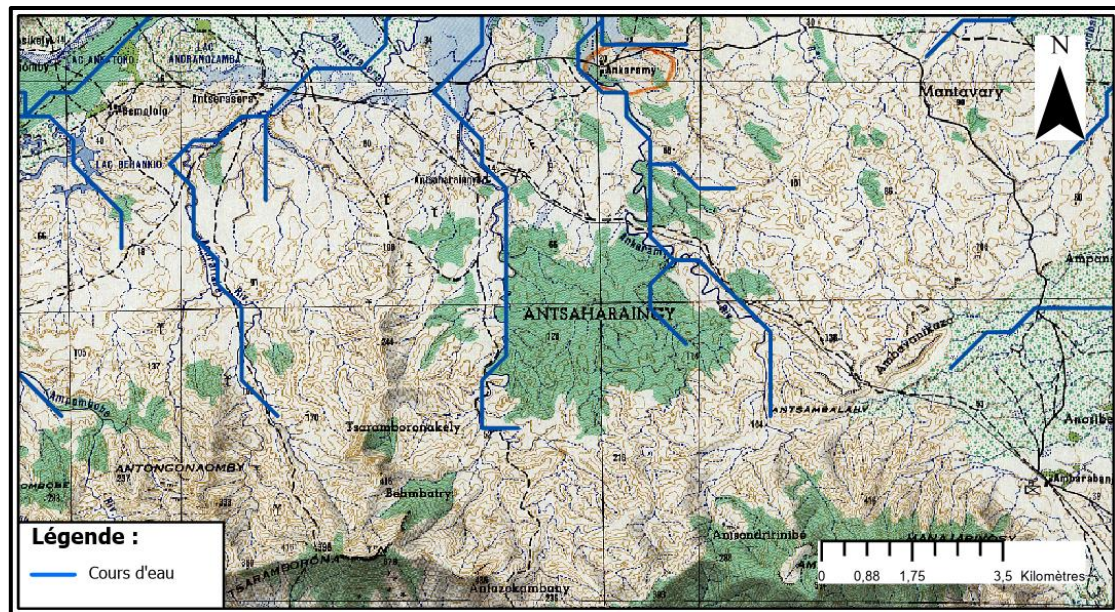


Figure 23 : Capture d'écran d'une carte topographique de la région d'Antanambao avec les cours d'eau issue de la base de données d'HydroSHEDS (en bleu foncé).

La figure 24 met en évidence une bonne superposition entre les cours d'eau issus de la carte topographique et ceux générés par le modèle « RouteDEM ». C'est notamment le cas dans les zones de relief au sud, ce qui était attendu, puisque l'algorithme D8 utilise les valeurs d'altitude de chaque pixel pour déterminer la direction des flux. À l'inverse, au nord on remarque que certaines rivières sont représentées par des lignes diagonales qui affichent un tracé semblant moins pertinent (figure 24). Cela s'explique par le manque de relief qui affecte l'efficacité de l'algorithme D8 (Gabrecht et Marz, 1997 ; Zhang et al., 2014). On peut donc considérer que les tracés des cours d'eau réalisés par le modèle « RouteDEM » sont pertinents et relativement précis, lorsqu'il y a des variations de reliefs (figure 24). En revanche, ils perdent en précision en l'absence de relief sans toutefois proposer des résultats aberrants.

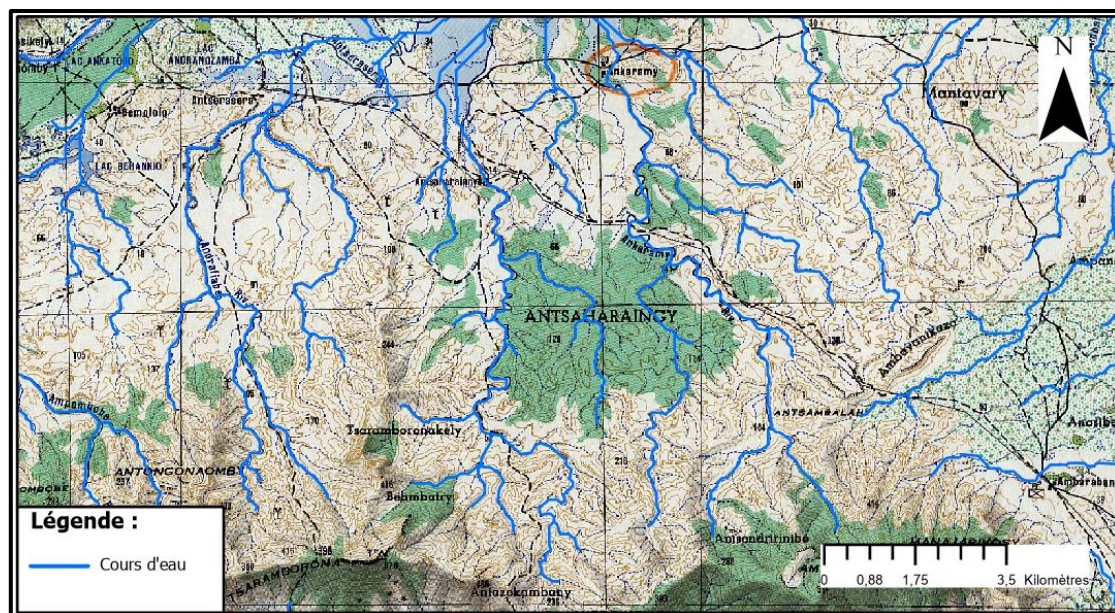


Figure 24 : Capture d'écran d'une carte topographique de la région d'Antanambao avec les cours d'eau de la couche NMada_Riv_1000 produits par le modèle « RouteDEM ».

Quelle que soit la variante considérée, les cours d'eau se superposent, comme le montre la figure 25, mais on remarque que la sensibilité du modèle pour leur détection évolue. Cela s'explique par l'influence de deux paramètres : la résolution du MNT (en mètres) et le seuil d'accumulation (en nombre de pixels). En multipliant ces facteurs, on obtient la surface contributive (en m²) qui correspond à la superficie en amont d'un point donné sur un MNT, à partir de laquelle l'eau s'écoule et contribue à l'écoulement en ce point. Ainsi, plus cette valeur est importante et plus cela nécessite une grande surface au modèle pour considérer un point du MNT comme un cours d'eau et inversement. Le tableau 2 compare les résultats des trois variantes en indiquant leurs paramètres respectifs.

Tableau 2 : Comparatif des paramètres (en rouge) et des résultats (en noir) entre les trois variantes du modèle « RouteDEM ».

Nom de la couche	Résolution du MNT (en m)	Seuil d'accumulation (en pixels)	Surface contributive (en m ²)	Nombre de pixels de rivières générés	Nombre d'entités	Longueur totale (en km)
NMada_Riv_1000	30	1000	30 000	2 267 303	122 359	77 682,30
NMada_Riv_300_C	10	300	3 000	33 689 215	3 685 683	385 352,40
NMada_Riv_2000_C	10	2000	20 000	14 288 770	619 793	163 210,50

Ces trois variantes permettent de définir plusieurs degrés de sensibilité dans le modèle afin d'affiner la détermination des cours d'eau. La première variante (NMada_Riv_1000) est la moins détaillée puisqu'elle met en évidence le plus faible nombre d'entités et la plus petite longueur totale (figure 25) (tableau 2). À l'inverse, la variante (NMada_Riv_300_C) est la plus détaillée puisque la surface contributive est 10 fois plus petite, ce qui permet au modèle de détecter environ 30 fois plus de cours d'eau. Toutefois, le nombre d'entités et la longueur totale n'augmentent pas de manière proportionnelle comme les surfaces contributives respectives. Enfin, la couche NMada_Riv_2000_C possède un niveau de détail intermédiaire puisque la surface contributive est de 20'000 m². Tandis que la longueur totale des cours d'eau est deux fois plus élevée qu'avec la première variante mais elle est moitié moins élevée que la troisième.

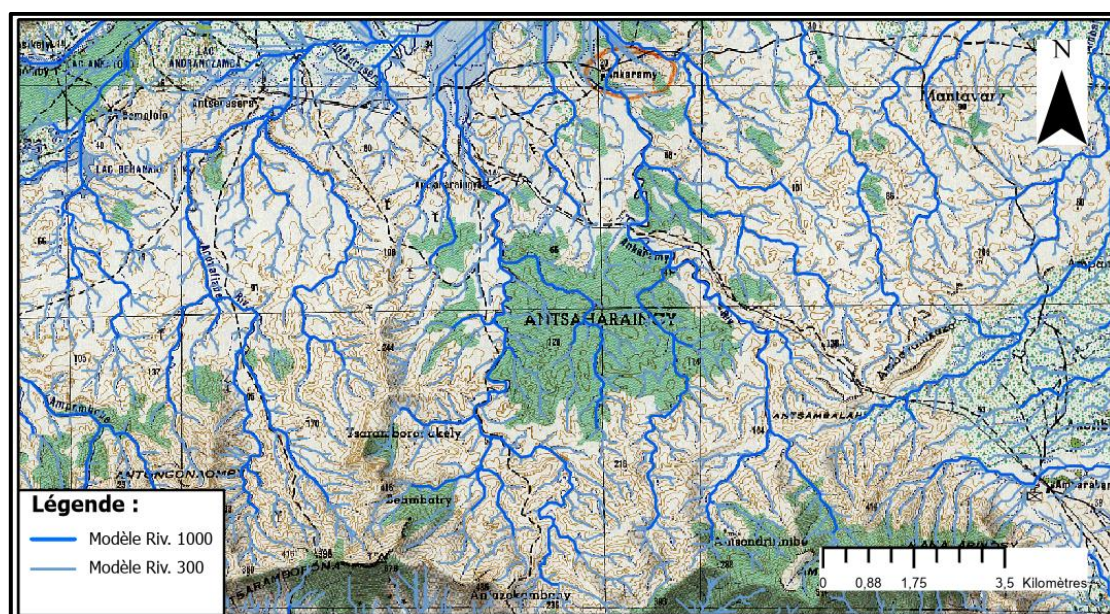


Figure 25 : Capture d'écran d'une carte topographique de la région d'Antanambao avec les cours d'eau des couches NMada_Riv_1000 (bleu foncé) et NMada_Riv_300_C (bleu clair) produits par le modèle « RouteDEM ».

4.3. Délimitation des bassins versants

Après avoir identifié les rivières du nord de Madagascar, le modèle « DelineateIt » a été utilisé pour délimiter les bassins versants. Contrairement aux cours d'eau, on observe très peu de différences entre les variantes selon les paramètres choisis : le seuil d'accumulation (Threshold Flow Accumulation) et la distance de rattachement (Snap Distance). Seul le nombre de bassins versants générés par le modèle évolue, mais il demeure toujours très élevé (~ 150'000 à 160'000 entités). En effet, pour les raisons techniques évoquées précédemment, le modèle génère quelques grands bassins versants dans les zones de relief comme au centre de la zone d'étude, là où l'algorithme D8 fonctionne correctement. En revanche, il génère énormément de petits bassins versants dans les zones côtières avec peu de relief comme le montre le tableau 3 pour la couche brute en sortie : **Watershed_1000** (figures 26). Toutefois, pour les analyses des services écosystémiques, on souhaite travailler à l'échelle des principaux bassins versants de l'île, c'est pourquoi la couche **Watershed_1000** a été modifiée manuellement afin de fusionner tous les bassins versants trop petits en de plus grandes entités. L'objectif étant d'avoir des bassins versants de taille similaire à ceux de la couche de référence d'HydroSHEDS et dans un nombre raisonnable. À l'issue du processus, on remarque que le nombre d'entités a très fortement diminué à 58 bassins versants dans la couche finale **Watershed_1000C**. De plus, les tailles minimales et moyennes des entités sont beaucoup plus importantes tout en ayant une distribution des surfaces plus homogène comme le montre les médianes (tableau 3) (annexes 6 et 7).

Tableau 3 : Comparatif des statistiques avant et après modification de la couche Watershed_1000.

Nom de la couche	Nombre d'entités	Surface de la plus petite entité (en km ²)	Surface de la plus grande entité (en km ²)	Taille moyenne des entités (en km ²)	Taille médiane des entités (en km ²)
Watershed_1000	159 642	0,0009	16 795,7	6,44	0,01
Watershed_1000C	58	15,4	17 301,3	1 730,50	889,7

La figure 26 illustre la délimitation des grands bassins versants dans le nord de Madagascar, selon deux sources de données différentes. Les limites issues du modèle « DelineateIt » d'InVEST (en bleu) et celles issues de HydroSHEDS (en rouge). Elles montrent globalement une structure similaire puisque les lignes se superposent dans de nombreux cas. Toutefois, plusieurs divergences peuvent être mises en évidence. Premièrement, on remarque des différences de délimitation de certains bassins versants. Cela se justifie par des choix arbitraires réalisés lors des modifications manuelles des entités de la couche **Watershed_1000** en sortie du modèle. En effet, il a été décidé dans certains cas de fusionner des petits bassins versants différemment des délimitations visibles sur la couche d'HydroSHEDS. Pour rappel, cette base de données contient plusieurs couches d'entités des bassins versants avec plusieurs niveaux de détails allant de 1 (très général) à 12 (très détaillé), dans ce cas c'est la couche n°7 qui a été retenue comme référence (**hybas_af_lev07_v1c**). Ce choix s'explique par le fait que la couche n°6 n'est pas assez détaillée avec moins de dix bassins versants dans la zone d'étude et que la couche n°8 est trop détaillée avec des bassins versants trop petits (Lehner & Grill, 2013). Il est

toujours possible, à partir de la couche **Watershed_1000**, de redéfinir les délimitations de certains bassins versants selon les besoins.

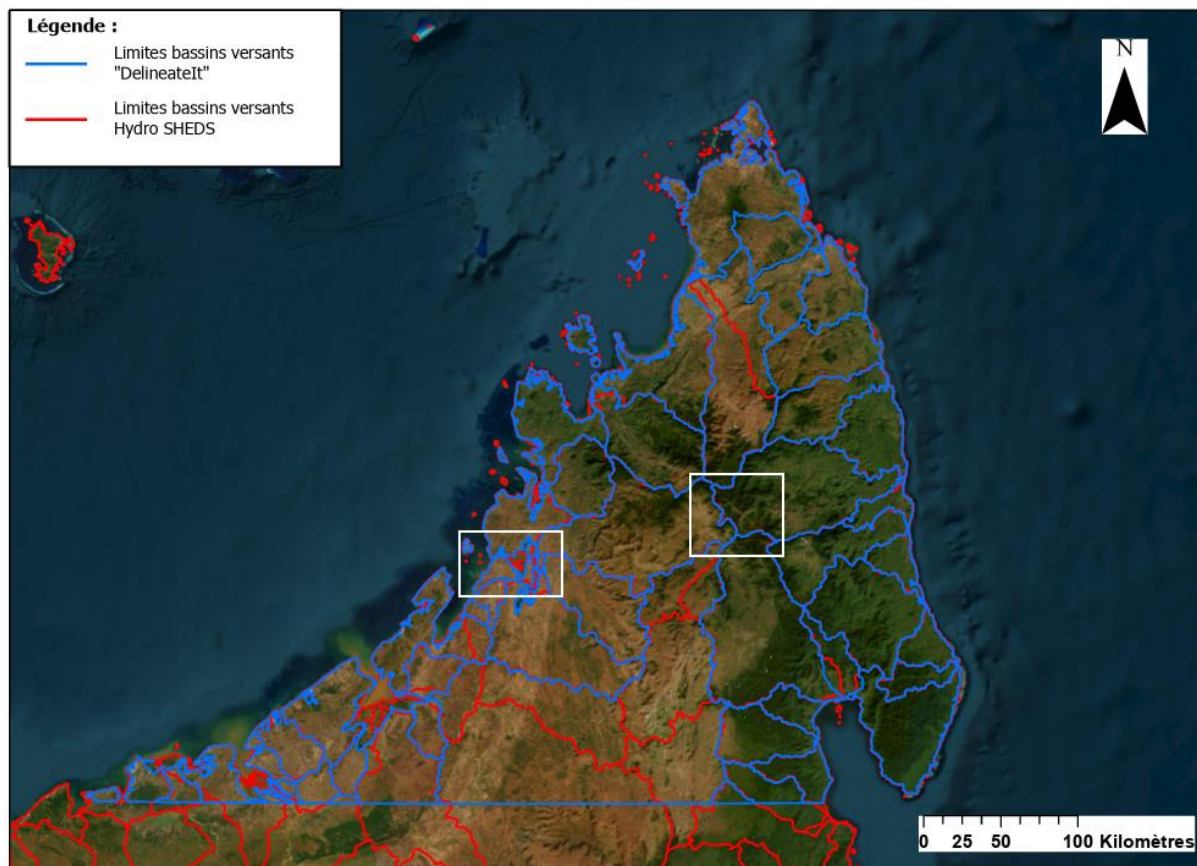


Figure 26 : Carte comparative des limites des bassins versants délimités à l'aide du modèle "DelineateIt" (en bleu) avec les limites de référence d'HydroSHEDS (en rouge). Les rectangles blancs indiquent les zones mises en avant dans les figures 27 et 28.

La seconde divergence notable entre les deux couches concerne la précision des délimitations. On observe que les contours bleus épousent de manière plus détaillée les reliefs et réseaux hydrographiques visibles, tandis que les limites rouges paraissent plus généralisées, avec des tracés plus rectilignes dans certaines zones (figures 27 et 28). Ces différences sont particulièrement visibles dans les régions côtières et dans les zones de confluence, où les frontières bleues se distinguent par un maillage plus fin ou un positionnement légèrement décalé (figure 27). Ces différences s'expliquent par le fait que les données d'HydroSHEDS couvrent l'ensemble du globe et sont construits à partir de MNT moins précis que le Alos 3D World utilisé dans le modèle « DelineateIt ». La précision de la couche d'HydroSHEDS est d'environ 500 mètres car elle est basée sur un SRTM à 15 arc-secondes tandis que celle produite avec InVEST a une précision de l'ordre de 30 à 50 mètres car elle se base sur un MNT avec une résolution de 30 mètres (1 arc-seconde) (Lehner & Grill, 2013).

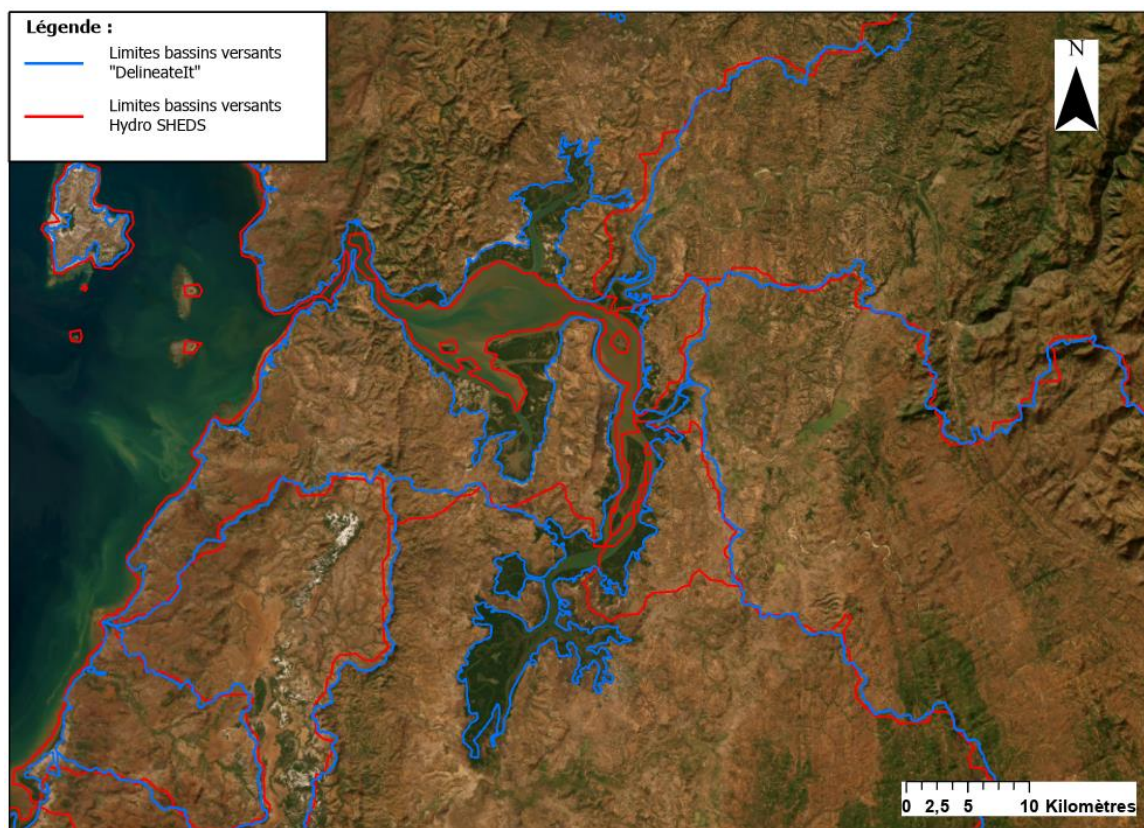


Figure 27 . Carte comparative des limites des bassins versants délimités à l'aide du modèle "Delineateit" (en bleu) avec les limites de référence d'HydroSHEDS (en rouge) dans une zone d'estuaire.

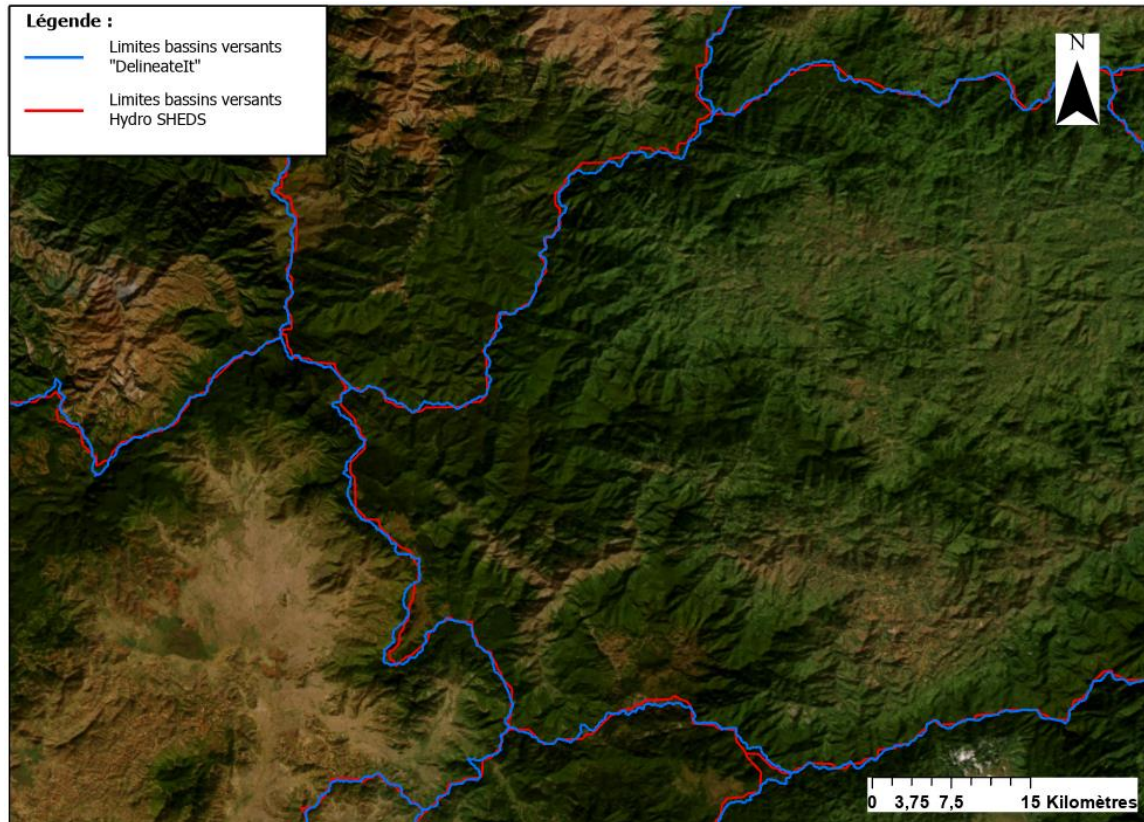


Figure 28 : Carte comparative des limites des bassins versants délimités à l'aide du modèle "Delineateit" (en bleu) avec les limites de référence d'HydroSHEDS (en rouge) dans une zone de relief.

4.4. Récoltes de données climatiques et pédologiques

Il n'a finalement pas été possible de réaliser une exécution du modèle « Seasonal Water Yield » dans le cadre de ce travail. En effet, les opérations précédentes ont nécessité beaucoup plus de temps que prévu. Cela s'explique par la nécessité de retravailler manuellement certaines couches afin d'avoir des données fiables (limites côtières, bassins versants). Cependant, il a été possible de rassembler les données requises pour le modèle et qui sont listées dans le tableau 1. L'ensemble des couches ont déjà été importées dans le projet pour s'assurer qu'elles soient pertinentes et qu'elles contiennent l'information recherchée. Il est nécessaire de projeter ces couches dans le système de coordonnées CCL puis de les découper avec le masque de la zone d'étude pour limiter leur emprise. Ce processus est en cours de réalisation et devrait être achevé avant l'arrivée de la prochaine stagiaire. À cela s'ajoutent les deux tables qui doivent encore être construites manuellement à l'aide de données supplémentaires. La figure 29 montre la couche CHELSA_kg2 après qu'elle a été projetée dans le système de coordonnées CCL puis découpée pour ne couvrir plus que la zone d'étude.

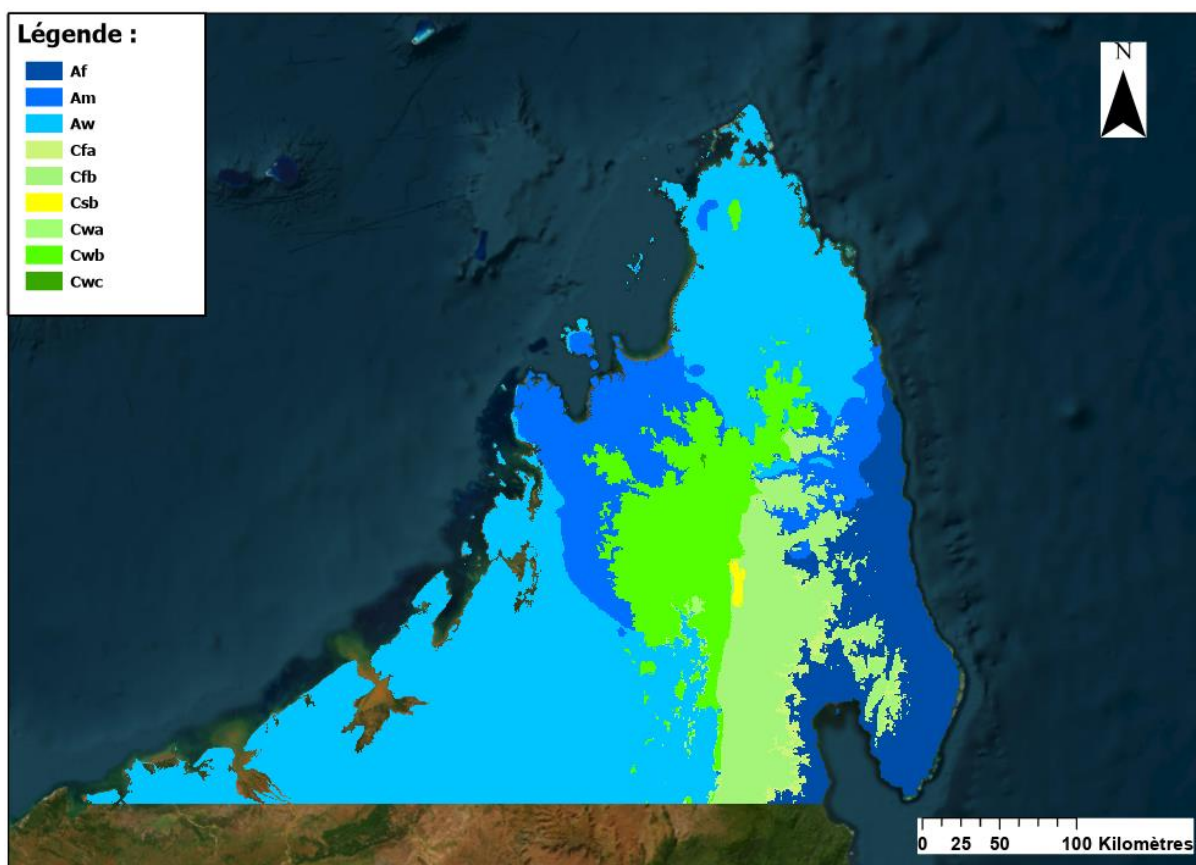


Figure 29 : Raster des zones climatiques issu de la base de données CHELSA pour le Nord de Madagascar selon la classification de Köppen adaptée par Peel et al., 2007.

5. Conclusion

Au cours de mon stage aux CJBG, j'ai réalisé une analyse hydrologique complète du Nord de Madagascar. Cette démarche s'inscrit dans le processus de construction de l'infrastructure écologique du Nord de Madagascar. Les données produites dans le cadre de ce travail viendront compléter les cartes de végétation et la carte de l'évolution de la couverture forestière déjà existantes. Pour réaliser mon analyse, j'ai pu m'appuyer sur les travaux réalisés par la précédente stagiaire Léna Hyvärinen. Elle a préalablement sélectionné un MNT de référence (Alos 3D World) puis elle a rédigé des scripts Python permettant de calculer plusieurs indices topographiques à partir de ce dernier sur ArcGIS. Ces travaux préparatoires m'ont permis de me familiariser avec le processus d'analyse hydrologique. Le logiciel InVEST a été retenu pour la cartographie des rivières et des bassins versants, car il servira également à l'évaluation des services écosystémiques. Ce choix assure une continuité méthodologique et réduit les risques d'erreurs ou d'incompatibilités entre ArcGIS et InVEST.

L'ensemble de ce travail a permis de mettre en place une base méthodologique solide pour la caractérisation hydrologique et l'évaluation future des services écosystémiques dans le Nord de Madagascar. Le recours au MNT Alos 3D World, validé par comparaison avec une carte topographique de référence, a démontré sa pertinence et sa fiabilité pour calculer des indices topographiques et modéliser les réseaux hydrographiques. Les modèles « RouteDEM » et « DelineateIt » du logiciel InVEST se sont révélés efficaces pour l'identification des cours d'eau et la délimitation des bassins versants, malgré certaines limites en zones de plaine inhérentes à l'utilisation de l'algorithme D8. Il a été nécessaire de simplifier et modifier manuellement la couche délimitant les bassins versants à cause de la génération d'un très grand nombre d'entités parfois aberrantes. La confrontation des résultats avec les données de référence d'HydroSHEDS a confirmé la cohérence et la précision locale du modèle, apportant une valeur ajoutée à la cartographie régionale.

Au-delà de ces aspects techniques, ce travail illustre l'intérêt d'une approche intégrant données de télédétection et outils de modélisation open source pour pallier le manque d'informations de terrain dans des régions difficiles d'accès comme le Nord de Madagascar. La préparation des données climatiques et pédologiques constitue une étape supplémentaire vers l'application du modèle « Seasonal Water Yield », qui permettra d'évaluer plus finement les services écosystémiques liés à la ressource en eau. Ainsi, ce projet offre non seulement une contribution méthodologique répliquable à d'autres contextes, mais aussi une base scientifique utile à la gestion durable des bassins versants et au soutien des politiques de conservation et de développement régional au travers de l'élaboration d'une infrastructure écologique.

6. Réflexions sur le déroulement du stage

J'ai été chaleureusement accueilli au sein de l'équipe du projet travaillant sur l'infrastructure écologique du Nord de Madagascar. Dès le premier jour, j'ai pu compter sur l'aide de chacun de mes encadrants : Louis Nusbaumer, Pascal Martin et Alessandra Havinga. Ils ont pris le temps pour me présenter aux autres membres des CJBG, me montrer les locaux et répondre à mes questions. Mes tâches et les objectifs à réaliser au cours du stage ont été clairement définis, ce qui m'a permis d'avancer sans accrocs. Malgré la période de vacances estivales, j'ai pu progresser dans mon travail de manière totalement autonome. Ce stage m'a permis de mieux connaître l'île de Madagascar et ses caractéristiques. J'ai pu me familiariser avec les méthodes d'analyse hydrologique à partir de données satellitaires. Enfin, ce travail m'a également fait prendre conscience des limites techniques que l'on peut rencontrer et de la manière de passer outre lorsque l'on travaille sur des régions du monde sous-monitorées avec un nombre limité de données à disposition, à l'instar de Madagascar. Je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble de l'équipe des CJBG pour cette période riche en apprentissage.

7. Bibliographie

- Abrams, M., Crippen, R., & Fujisada, H. (2020). ASTER global digital elevation model (GDEM) and ASTER global water body dataset (ASTWBD). *Remote Sensing*, vol. 12, iss. 7, n°1156, p. 12. <https://doi.org/10.3390/rs12071156>
- Ali, J. R., Aitchison, J. C. (2008). Gondwana to Asia: Plate tectonics, paleogeography and the biological connectivity of the Indian sub-continent from the Middle Jurassic through latest Eocene (166– 35 Ma). *Earth-Science Reviews*, vol. 88, iss. 3-4, p. 145–166. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.01.007>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage, n° 56, p. 333. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Allnutt, T. F., Ferrier, S., Manion, G., Powell, G. V. N., Ricketts, T. H., Fisher, B. L., Harper, G. J., Irwin, M. E., Kremen, C., Labat, J.-N., et al. (2008). A method for quantifying biodiversity loss and its application to a 50- year record of deforestation across Madagascar. *Conservation Letters*, vol. 1, p. 173–181. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2008.00027.x>
- Anderson, A., Clark, G., Haberle, S., Larson, G., Seetah, K. (2022). Editorial: Early Human Colonization of Remote Indian Ocean Islands and Its Ecological Impacts. *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 10, p. 3. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.915306>
- Andriambeloson, J. A., Paris, A., Calmant, S., & Rakotondraompiana, S. (2020). Re-initiating depth-discharge monitoring in small-sized ungauged watersheds by combining remote sensing and hydrological modelling: a case study in Madagascar. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 65, iss. 16, p. 2709-2728. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1833013>
- Antonelli, A., Smith, R. J., Perrigo, A. L., Crottini, A., Hackel, J., Testo, W., Farooq, H., Torres Jiménez, M. F., Andela, N., Andermann, T., et al. (2022). Madagascar's extraordinary biodiversity : Evolution, distribution, and use. *Science*, vol. 378, iss. 6623, 10 p. <https://doi.org/10.1126/science.abf0869>
- Apeh, O. I., Uzodinma, V. N., Ebinne, E. S., Moka, E. C. and Onah, E. U. (2019). Accuracy Assessment of Alos W3d30, Aster Gdem and Srtm30 Dem: A Case Study of Nigeria, West Africa. *Journal of Geographic Information System*, vol. 11, p. 111-123. <https://doi.org/10.4236/jgis.2019.112009>
- Barnosky, A. D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G. O. U., Swartz, B., Quental, T. B., Marshall, C., McGuire, J. L., Lindsey, E. L., Maguire, K. C., et al. (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived ? *Nature*, vol. 471, p. 51–57 <https://doi.org/10.1038/nature09678>
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2002). Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, vol. 20, n° 3, p. 12-17.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, vol. 24, iss. 1, p. 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Brinck, K., Fischer, R., Groeneveld, J., Lehmann, S., Dantas De Paula, M., Pütz, S., et al. (2017). High resolution analysis of tropical forest fragmentation and its impact on the

- global carbon cycle. *Nature Communications*, vol. 8, n° 14855, p. 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms14855>
- Callmander, M. W., Phillipson, P., Schatz, G., Andriambololonera, S., Rabarimanarivo, M., Rakotonirina, N., Raharimampionona, J., Chatelain, C., Gautier, L., Lowry, P. (2011). The endemic and non-endemic vascular flora of Madagascar updated. *Plant Ecology and Evolution*, vol. 144, iss. 2, p. 121–125. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2011.513>
- Carr, D. L., Suter, L., Barbieri, A. (2005). Population Dynamics and Tropical Deforestation: State of the Debate and Conceptual Challenges. *Population and Environment*, vol. 27, p. 89–113. <https://doi.org/10.1007/s11111-005-0014-x>
- Coutts, C., & Hahn, M. (2015). Green infrastructure, ecosystem services, and human health. *International journal of environmental research and public health*, vol. 12, iss. 8, p. 9768-9798. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809768>
- Dudley, N. (2008). Guidelines for applying protected area management categories. IUCN, p. 86.
- Fahrig, L. (2003). Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 34, p. 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
- Garbrecht, J., Martz, L. W. (1997). L'attribution de la direction du drainage sur des surfaces planes dans les modèles numériques d'élévation raster. *Journal of Hydrology*, vol. 193, n° 1-4, p. 204-213, ISSN 0022-1694. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03138-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03138-1).
- Gardner, C. J., Nicoll, M. E., Mbohoahy, T., Oleson, K. L., Ratsifandrihamanana, A. N., Ratsirarson, J., et al. (2013). Protected areas for conservation and poverty alleviation: experiences from Madagascar. *Journal of Applied Ecology*, vol. 50, n° 6, p. 1289-1294. <https://www.jstor.org/stable/24031380>
- Gardner, C. J., Nicoll, M. E., Birkinshaw, C., Harris, A., Lewis, R. E., Rakotomalala, D., & Ratsifandrihamanana, A. N. (2018). The rapid expansion of Madagascar's protected area system. *Biological Conservation*, vol. 220, p. 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.011>
- Grinand, C., Rakotomalala, F., Gond, V., Vaudry, R., Bernoux, M., Vieilledent, G. (2013). Estimating deforestation in tropical humid and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. *Remote Sensing of Environment*, vol. 139, p. 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.008>
- Hamel, P., Valencia, J., Schmitt, R., Shrestha, M., Piman, T., Sharp, R. P., Francesconi, W., Guswa, A. J., (2020). Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar. *Journal of Environmental Management*, vol. 270, p. 13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110792>
- Hansford, J., Wright, P. C., Rasoamiamanana, A., Pérez, V. R., Godfrey, L. R., Errickson, D., Turvey, S. T. (2018). Early Holocene human presence in Madagascar evidenced by exploitation of avian megafauna. *Science Advances*, vol. 4, iss. 9, 6 p. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat6925>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* vol. 25, p. 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

- Humbert, H. (1955). Les territoires phytogéographiques de Madagascar. *Année biologique*, vol. 31, n° 3, p. 439-448.
- Hyvärinen, L. (2024). Dynamique temporelle de la couverture forestière et compilation de variables environnementales du nord de Madagascar. Mémoire pour le Certificat complémentaire de géomatique, Université de Genève, Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève.
- IPBES (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, H.P. & Kessler, M. (2017) Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., Kessler, M. (2018). Data from: Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *EnviDat*. <https://doi.org/10.16904/envidat.228.v2.1>
- Kramer, R. A., Richter, D. D., Pattanayak, S., & Sharma, N. P. (1997). Ecological and economic analysis of watershed protection in Eastern Madagascar. *Journal of Environmental Management*, vol. 49, iss. 3, p. 277-295. <https://doi.org/10.1006/jema.1995.0085>
- Kull, C. A. (2014). The roots, persistence, and character of Madagascar's conservation boom. In *Conservation and Environmental Management in Madagascar*, Routledge, p. 26.
- Lehmann, A., Sanguet, A., Waller, N. & Guinaudeau, B. (2023) Infrastructure Ecologique du Grand Genève - Synthèse. In p. 37. Université de Genève.
- Lehner, B. & Grill G. (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, vol. 27, iss. 15, p. 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
- Liquete, C., Kleeschulte, S., Dige, G., Maes, J., Grizzetti, B., Olah, B., & Zulian, G. (2015). Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: A Pan-European case study. *Environmental Science & Policy*, vol. 54, p. 268-280. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.07.009>
- Maes, J., Crossman, N. D., & Burkhard, B. (2016). Mapping ecosystem services. In *Routledge handbook of ecosystem services*, p. 188-204.
- Milian, J. et Rodary, E. (2010). La conservation de la biodiversité par les outils de priorisation Entre souci d'efficacité écologique et marchandisation. *Revue Tiers Monde* 2010/2, n°202, p. 33-56. <https://doi.org/10.3917/rtm.202.0033>.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC, p. 155.
- Mittermeier, R. A., Turner, W. R., Larsen, F. W., Brooks, T. M., Gascon, C. (2011). Global Biodiversity Conservation : The Critical Role of Hotspots. In: Zachos, F., Habel, J. (eds)

- Biodiversity Hotspots, p. 3-22. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-20992-5_1
- Moat, J., Smith, P. P. (2007). Atlas of the vegetation of Madagascar. Royal Botanic Gardens, Kew, p. 124.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A. B., Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, vol. 403, p.853–858.
<https://doi.org/10.1038/35002501>
- Natural Capital Project. (2025). InVEST 3.15.0. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>
- De Oliveira-Junior, N. D., Heringer, G., Bueno, M. L., Pontara, V., & Meira-Neto, J. A. A. (2020). Prioritizing landscape connectivity of a tropical forest biodiversity hotspot in global change scenario. *Forest Ecology and Management*, vol. 472, 118247.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118247>
- Ondo, I., Dhanjal-Adams, K. L., Pironon, S., Silvestro, D., Colli-Silva, M., Deklerck, V., Grace O. M., Monro, A. K., Nicolson, N., Walker, B., Antonelli, A. (2024). Plant diversity darkspots for global collection priorities. *New Phytologist*, vol. 244, iss. 2, p. 719-733.
<https://doi.org/10.1111/nph.20024>
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., et al. (2017). Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. *Current opinion in environmental sustainability*, vol. 26, p. 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, vol. 11, iss. 5, p. 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pierron, D., Heiske, M., Razafindrazaka, H., Rakoto, I., Rabetokotany, N., Ravololomanga, B., Rakotozafy, L. M. A., Rakotomalala, M. M., Razafiarivony, M., Rasoarifetra, B., et al. (2017). Genomic landscape of human diversity across Madagascar. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, n°32, p. 9.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1704906114>
- Ralimanana, H., Perrigo, A. L., Smith, R. J., Borrell, J. S., Faurby, S., Rajaonah, M. T., et al. (2022). Madagascar's extraordinary biodiversity: Threats and opportunities. *Science*, vol. 378, iss. 6623, p. 14. <https://doi.org/10.1126/science.adf1466>
- Randriatsara, H. H.-R. H., Hu, Z., Xu, X., Ayugi, B., Sian, K. T. C. L. K., Mumo, R., & Ongoma, V. (2022). Evaluation of gridded precipitation datasets over Madagascar. *International Journal of Climatology*, vol. 42, iss. 13, p. 7028–7046. <https://doi.org/10.1002/joc.7628>
- Ramahaimandimby, Z., Randriamaherisoa, A., Vanclooster, M., & Biëlders, C. L. (2023). Driving factors of the hydrological response of a tropical watershed: The Ankavia River Basin in Madagascar. *Water*, vol. 15, iss. 12, p. 24. <https://doi.org/10.3390/w15122237>
- Ross, C. W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W., & Hanan, N. P. (2018). Global hydrologic soil groups (HYSOGs250m) for curve number-based runoff modeling. ORNL Distributed Active Archive Center (DAAC) dataset 10.3334/ORNLDAAAC/1566.<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1566>

- Salmona, J., Heller, R., Quéméré, E., Chikhi, L. (2017). Climate change and human colonization triggered habitat loss and fragmentation in Madagascar. *Molecular Ecology*, vol. 26, iss.19, p. 5203–5222. <https://doi.org/10.1111/mec.14173>
- Snyder, J. P. (1993). *Flattening the Earth. Two thousands years of map projection*. Chicago and London : University of Chicago Presser, p. 384.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of America bulletin*, vol. 63, iss. 11, p. 1117-1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Tadono, T., Nagai, H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., Iwamoto, H. (2016). Generation of the 30 M-mesh global digital surface model by ALOS PRISM. *ISPRS-The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B4, p. 157–162. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B4-157-2016
- USDA-SCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release n° 55 (TR-55), p. 8. USDASCS, Washington DC.
- Verhagen, W., Kukkala, A. S., Moilanen, A., van Teeffelen, A. J., & Verburg, P. H. (2017). Use of demand for and spatial flow of ecosystem services to identify priority areas. *Conservation Biology*, vol. 31, iss. 4, p. 860-871. <https://doi.org/10.1111/cobi.12872>
- Vieilledent, G., Grinand, C., Rakotomalala, F. A., Ranaivosoa, R., Rakotoarijaona, J.-R., Allnutt, T. F., Achard, F. (2018). Combining global tree cover loss data with historical national forest cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Biological Conservation*, vol. 222, p. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.008>
- Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA. Vol. 200, p. 1.
- Westman, W. E. (1977). How Much Are Nature's Services Worth? Measuring the social benefits of ecosystem functioning is both controversial and illuminating. *Science*, vol. 197, iss. 4307, p. 960-964. <https://doi.org/10.1126/science.197.4307.960>
- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N. E., Xu, P., Ramoino, F., Arino, O., (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>
- Zhang, S., Zhao, B., & Erdun, E. (2014). Watershed characteristics extraction and subsequent terrain analysis based on digital elevation model in flat region. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 19, iss. 11, p. 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000961](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000961)

Annexes :

Annexe 1: Script Python pour le calcul d'informations dérivées et d'indices topographiques (TWI, DAH)

```

## Summer 2024
## Lena Hyvärinen
# Title: Topographic Wetness Index - TWI and Diurnal Anisotropic Heating index - DAH
# For TWI
# Use a raster DEM to calculate the surface wetness or dryness dependent on the slope
# calculate thanks to the information of the altitude of your DEM
# Not good predictor if water is controlled by human and flat field
#  $TWI = \ln(\text{WaterAccumulation} * \text{surface} / \tan(\text{slope in radian}))$ 
# Weiss, A. (2001), Topographic position and landforms analysis, in Poster Presentation, vol.
200, ESRI User Conference, San Diego, Calif.
# For DAH
# Use a raster DEM to calculate the DAH takes into account both slope and aspect,.
# DAH is an indicator of both the effects of temperature and topographic solar radiation
#  $DAH = \cos(\text{ALPHA}_{\text{max}} - \text{Alpha}) * \arctan(\text{Beta})$ 
# Alpha = slope aspect
# Alpha max = Slope aspect receiving the maximum amount of heat
# Beta = Slope angle in radians
# Bohner, J., and O. Antonic' (2009), Land-surface parameters specific to topo-climatology,
Dev. Soil Sci., 33, 195–226.
# Cristea, N. C., I. Breckheimer, M. S. Raleigh, J. HilleRisLambers, and J. D. Lundquist (2017),
An evaluation of terrain-based downscaling of fractional snow covered area data sets based on
LiDAR-derived snow data and orthoimagery, Water Resour. Res., 53,6802–6820,
doi:10.1002/2017WR020799.
# Workflow
# 1. Calculate slope in degree and conversion in radian
# 2. Determine water flux accumulation
# 3. Calculate TWI
# 4. Generate Slope Aspect for DAH
# 5. Generate DAH
# Four parameters are requested for this code:
# On your data
# 0. Your Workspace (Workspace/ Espace de travail)
# 1. A DEM (raster / Couche raster)

```

```

# 2. Knowing your Z-factor (double, default =1)
# 3. Cell Size (Double, default = 30m)
# 4. AspectMaxHeat(degree) (double, default = 22.58 for south hemispher, between 0 and 360)
#-----
## 0. Starting parameter
# Import system modules
import arcpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *
import os, sys, math, decimal, traceback
# Set environment settings
GDB_Input = arcpy.env.workspace = arcpy.GetParameterAsText(0)
# Your DEM (without NoData and with a z-resolution)
inRaster = arcpy.GetParameterAsText(1)
# Get the name of your raster
Name = arcpy.Describe(inRaster).baseName
# Z-factor
zFactor = float(arcpy.GetParameterAsText(2))
# Slope aspect receiving the maximum amount of heat
AspectMaxHeat = float(arcpy.GetParameterAsText(3))
#-----
## 1. Slope
# Set local variables
outMeasurement = "DEGREE"
method = "PLANAR"
zUnit = "METER"
# Execute Slope
SlopeRaster = Slope(inRaster, outMeasurement, zFactor, method, zUnit)
# Save the output
SlopeRaster.save(os.path.join(GDB_Input, Name + "_SlopeDeg"))
# Replace 0 values with 1 to perform the ln function
slopeNo0 = Con(SlopeRaster <= 0, 1, SlopeRaster)
# Convert slope to radian
SlopeRadian = slopeNo0 * 0.01745 # Conversion factor from degrees to radians

```

```

# Save the output
SlopeRadian.save(os.path.join(GDB_Input, Name + "_SlopeRad"))
arcpy.AddMessage("First step done (slope)")
#-----

# 2. Determine water flux accumulation
# Set local variables
force_flow = "NORMAL" # or "FORCE"
inWeightRaster = "" # if you have a weight raster
# Execute FlowDirection
out_flow_direction = FlowDirection(inRaster, force_flow)
# Execute FlowAccumulation
out_accumulation = FlowAccumulation(out_flow_direction, inWeightRaster)
# Save the outputs
out_flow_direction.save(os.path.join(GDB_Input, Name + "_Direction"))
out_accumulation.save(os.path.join(GDB_Input, Name + "_Accumulation"))
arcpy.AddMessage("Second step done (water flux accumulation)")
#-----

# 3. Calculate TWI = ln(Accumulation*surface/tan(slope))
# Set local variables
surface_pixel = float(arcpy.GetParameterAsText(3))
# Calculate TWI
twi_raster = Ln((out_accumulation * (surface_pixel * surface_pixel)) / Tan(SlopeRadian))
# If NoData, generate a raster NoData replace by 0 as Accumulation is 0
TWI= Con(IsNull(twi_raster),0, twi_raster)
# Save the output
TWI.save(os.path.join(GDB_Input, Name + "_TWI"))
arcpy.AddMessage("Third step done (TWI)")
#-----

## 4. Exposure/Aspect
# Set local variables
outPolygon = GDB_Input + "\\ " + "ExposurePolygons"
method = "PLANAR" #Geodesic
#zUnit = "METER"
# Execute Aspect
Expo = Aspect(inRaster)

```

```
# Save the output
Expo.save(os.path.join(GDB_Input, "Exposure"))
arcpy.AddMessage("Fourth step done (Exposure/Aspect)")
```

```
#-----
```

```
## 5. Calculation DAH
```

```
# Calculate TWI
```

```
DAH = Cos(AspectMaxHeat - Expo)* ATan(SlopeRadian)
```

```
# Save the output
```

```
DAH.save(os.path.join(GDB_Input, Name + "_DAH"))
```

```
arcpy.AddMessage("Last step done (DAH)")
```

```
#-----
```

Annexe 2 : Script Python pour le calcul du Topographic Positioning Index (TPI)

```
## Summer 2024
```

```
## Lena Hyvärinen
```

```
# Title: Topographic Positioning Index (TPI)
```

```
# Use a raster DEM to calculate the topographic position of your pixel considering its surrounding.
```

```
# The topographic position index, TPI, represents an indicator of a given pixel's position relative to the mean elevation of a defined surrounding area/neighborhood:
```

```
#  $TPI = z_0 - z$ ; with  $z = 1/nR \sum_{i=1}^R z_i$ 
```

```
#  $z_0$  is the elevation of the given cell,
```

```
#  $z$  is the average elevation of the neighborhood containing R number of cells.
```

```
#Negative TPI indicates that the pixel is lower than the neighborhood average elevation, whereas positive indicates that the pixel is higher than the average.
```

```
#Weiss, A. (2001), Topographic position and landforms analysis, in Poster Presentation, vol. 200, ESRI User Conference, San Diego, Calif.
```

```
# Workflow for TPI
```

```
# Six trials of surrounding will be generated, twice bigger than the last one (ex: 25, 50, 100, 200, 400, 800)
```

```
# 1. Focal Statistic
```

```
# I notice that "MEAN" and "STD" are complementary in information: landform and level, respectively. Thus, I propose to generate both.
```

```
# 2. Minus to calculate TPI
```

```
# Four parameters are requested for this code:
```

```
# On your data
```

```

# 0. Your Workspace      (Workspace/ Espace de travail)
# 1. A DEM               (raster / Couche raster)
# 2. Knowing your Z-factor (double, default =1)
# 3. SurroundingSize     (Double, default = 25)
# 4. Doubling occurency  (Double, default = 6)
#-----
## 0. Starting parameter
# Import system modules
import arcpy
from arcpy import env
from arcpy.sa import *
import os, sys, math, decimal, traceback
# Set environment settings
GDB_Input = arcpy.env.workspace = arcpy.GetParameterAsText(0)
# Your DEM (without NoData and with a z-resolution)
inRaster = arcpy.GetParameterAsText(1)
# Get the name of your raster
Name = arcpy.Describe(inRaster).baseName
# Starting Surrounding Size (rectangle)
Size = int(arcpy.GetParameterAsText(2))
#Number of time of doubling
n = int(arcpy.GetParameterAsText(3))
#-----
# TPI
## It is the field data which will validate the relevance of your TPI and justify the choice of
your rectangle size
# Here, we use two mathematical models (Mean and STD) and a loop implementing different
trials for the rectangle size (each iteration, twice bigger)
# Generate the Width list using a loop
Width =[Size * (2 ** i) for i in range(n)]
Stat = ["MEAN", "STD"]
# "MEAN", "MAJORITY", "MAXIMUM", "MEDIAN", "MINIMUM", "MINORITY",
"PERCENTILE", "STD", "SUM", "VARIETY"
# Loop with different rectangle sizes and statistics
for s in Width:
    Neighborhood = NbrRectangle(s, s, "CELL")

```

for m in Stat:

1. Execute Focal Statistic

FocalStat = FocalStatistics(inRaster, Neighborhood, m)

2. Execute TPI through the subtraction of the inRaster and the FocalStatistic

TPI = Minus(inRaster, FocalStat)

Save the output

TPI.save(os.path.join(GDB_Input, Name + "_TPI_" + m + f"_{s}"))

#-----

Annexe 3 : Script Python pour le prétraitement du MNT

Title: Pretreatment ALOS DEM before analysis (Lambert Conformal Conic projection - centré)

Import system modules

import arcpy

from arcpy import env

from arcpy.sa import *

import os, traceback

Set environment settings

GDB_Input = arcpy.GetParameterAsText(0) # Workspace

inRaster = arcpy.GetParameterAsText(1) # Input DEM raster

CellSize = arcpy.GetParameterAsText(2) # Cell size (default: 30)

Get the name of your raster

Name = arcpy.Describe(inRaster).baseName

Check out the Spatial Analyst license

arcpy.CheckOutExtension("Spatial")

Define custom Lambert Conformal Conic projection (centrée sur ta zone d'étude)

Projection = arcpy.SpatialReference()

Projection.loadFromString("""

PROJCS["LCC_Nord_Madagascar",

GEOGCS["GCS_WGS_1984",

DATUM["D_WGS_1984",

SPHEROID["WGS_1984",6378137.0,298.257223563]],

PRIMEM["Greenwich",0.0],

UNIT["Degree",0.0174532925199433]],

```

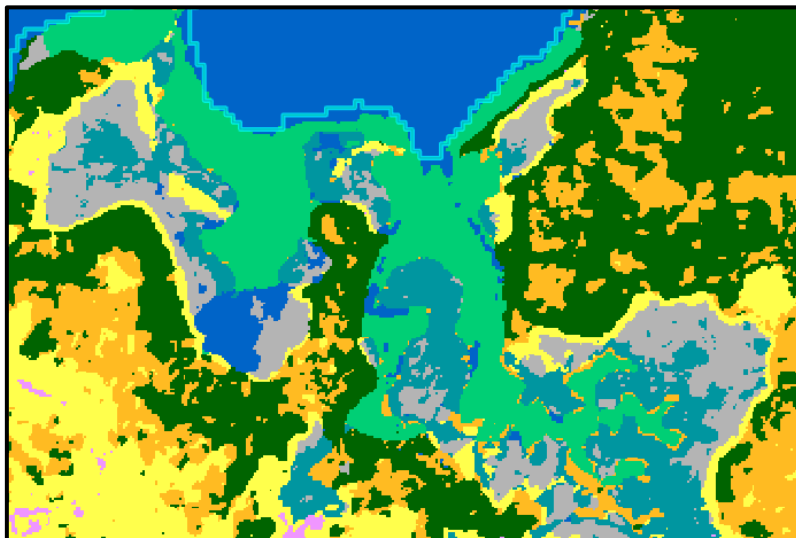
PROJECTION["Lambert_Conformal_Conic"],
PARAMETER["False_Easting",500000.0],
PARAMETER["False_Northing",0.0],
PARAMETER["Central_Meridian",48.0],
PARAMETER["Standard_Parallel_1",-11.5],
PARAMETER["Standard_Parallel_2",-16.5],
PARAMETER["Latitude_Of_Origin",-14.0],
UNIT["Meter",1.0]]
")
# -----
# Step 1: Reproject the raster
arcpy.AddMessage("1/3 - Reprojection du MNT en Lambert Conformal Conic (centré)...")
outRaster = os.path.join(GDB_Input, Name + "_prjL")
Resampling = "BILINEAR"
arcpy.management.ProjectRaster(inRaster, outRaster, Projection, Resampling, CellSize)
# -----
# Step 2: Extract values >= 0
arcpy.AddMessage("2/3 - Extraction des valeurs positives (>= 0)...")
AboveSee = ExtractByAttributes(outRaster, "VALUE >= 0")
AboveSeePath = os.path.join(GDB_Input, Name + "_posL")
try:
    AboveSee.save(AboveSeePath)
    arcpy.AddMessage("Raster des valeurs positives sauvegardé.")
except Exception as e:
    arcpy.AddError("Erreur lors de l'enregistrement de 'AboveSee' : " + str(e))
    raise
# -----
# Step 3: Fill NoData values if present
arcpy.AddMessage("3/3 - Remplissage des NoData s'il y en a...")
Neighborhood = NbrRectangle(4, 4, "CELL")
Stat = "MEAN"
OutRasterFinal = os.path.join(GDB_Input, Name + "_rdyL")
inRasterClean = Con(IsNull(AboveSee), FocalStatistics(AboveSee, Neighborhood, Stat),
AboveSee)
try:

```

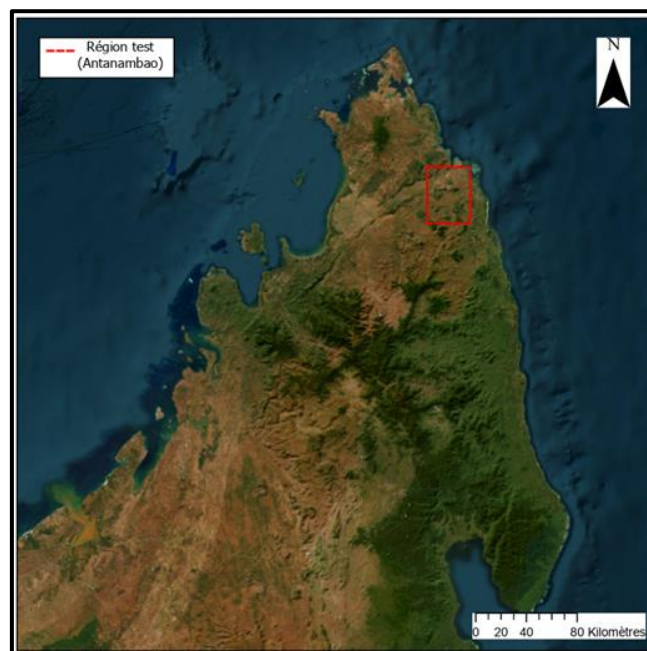
```

inRasterClean.save(OutRasterFinal)
arcpy.AddMessage("MNT final sans NoData sauvegardé.")
except Exception as e:
    arcpy.AddError("Erreur lors de l'enregistrement du raster final : " + str(e))
    raise
# -----
# Done
arcpy.AddMessage("Script terminé avec succès.")

```

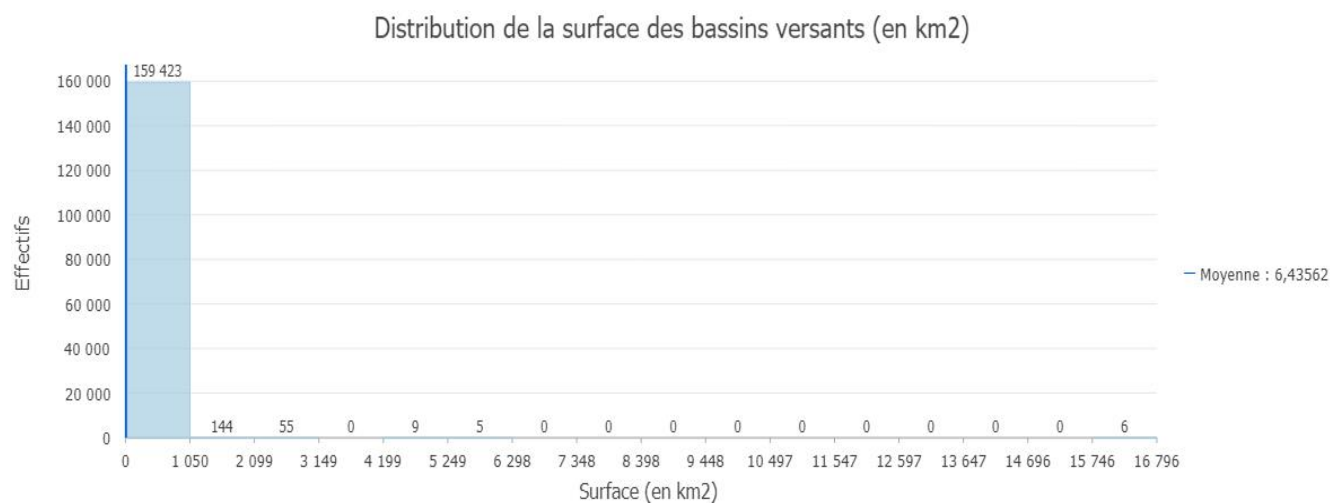


Annexe 4 : Capture d'écran de la couche LULC d'un estuaire du Nord de Madagascar avec l'eau (en bleu) et la mangrove (en turquoise).



Annexe 5 : Localisation de la région d'Antanambao

Annexe 6 : Histogramme de la distribution de la surface des bassins versants en sortie du modèle « DelineateIt »



Annexe 7 : Histogramme de la distribution de la surface des bassins versants après modification de la couche

