

# Note technique de travaux d'étude

## Faisabilité de la production d'une typologie fine des écosystèmes pour Madagascar



# TABLE DES MATIERES

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>2</b>
<b>1. CONTEXTE .....</b>	<b>3</b>
<b>2. OBJECTIF DE L'ETUDE .....</b>	<b>3</b>
<b>3. RESUME.....</b>	<b>4</b>
<b>4. ETAT DES LIEUX .....</b>	<b>5</b>
<b>5. CLASSIFICATION ET CARTOGRAPHIE .....</b>	<b>9</b>
5.1. LE CAS SPECIFIQUE DE L'EVOLUTION ET DIVERSITE BIOLOGIQUE A MADAGASCAR .....	9
5.2. ETAT DES LIEUX DES TRAVAUX DE CLASSIFICATION DES ECOSYSTEMES ET CARTOGRAPHIE DE VEGETATION A MADAGASCAR	9
5.3. CLASSIFICATION ET TYPOLOGIE SELON L'UICN .....	11
5.3.1. <i>La classification globale UICN</i> .....	11
5.3.2. <i>La liste rouge des écosystèmes à Madagascar selon UICN</i> .....	12
<b>6. LACUNES IDENTIFIEES .....</b>	<b>15</b>
<b>7. RECOMMANDATIONS POUR L'ELABORATION D'UNE TYPOLOGIE FINE DES ECOSYSTEMES/HABITATS ET VEGETATIONS A MADAGASCAR .....</b>	<b>17</b>
<b>8. ANNEXE.....</b>	<b>19</b>
8.1. ETAT DES LIEUX DU TERRITOIRE DE MADAGASCAR .....	19
8.1.1. <i>Caractéristiques climatiques</i> .....	19
8.1.2. <i>Géologie de Madagascar</i> .....	21
8.1.3. <i>Pédologie et types de sols de Madagascar</i> .....	26
8.1.4. <i>Topographie et géomorphologie</i> .....	28
8.1.5. <i>Hydrologie et hydrographie</i> .....	29
<b>9. A PROPOS DE COMBO+ .....</b>	<b>34</b>

# I. CONTEXTE

Madagascar est reconnu comme un hotspot mondial de biodiversité avec le taux d'endémisme le plus élevé au monde. Mais malheureusement cette biodiversité est soumise à d'énormes pressions liées à l'exploitation des ressources naturelles, l'impact des industries extractives et travaux d'aménagement, et ce dans un contexte global d'accroissement démographique, de faible gouvernance et d'autres problématiques de développement.

C'est dans ce contexte que le projet COMBO+ (COnservation, Minimisation et compensation des impacts au titre de la BiODiversité) s'inscrit, en visant à concilier développement économique et prise en compte des enjeux de biodiversité, notamment à travers le renforcement et la bonne application de la hiérarchie d'atténuation (HA) des impacts sur la biodiversité. Ce projet est financé par l'AFD et le FFEM est mis en œuvre dans 6 pays (Guinée, Ouganda, Mozambique, Madagascar, Laos et Myanmar). A Madagascar il est mis en œuvre par WCS et Biotope Madagascar sur une durée de 4 ans, de 2021 à 2025.

COMBO+ consiste en un renforcement du cadre institutionnel incluant la réglementation (textes, lois, etc.) telle que le décret MECIE (Mise en Compatibilité des Investissement avec l'Environnement) ; le développement d'outils et de méthodologies ; le renforcement des capacités humaines, en ciblant à la fois les institutions publiques mais également les acteurs du secteur privé et de la société civile ; et enfin un recueil de bonnes pratiques identifiées sur une série d'étude de cas concrets mis en œuvre à Madagascar.

## 2. OBJECTIF DE L'ETUDE

Dans le cadre de la composante 2 du projet COMBO+, l'étude a été lancée pour contribuer au développement des outils et des guides pour une bonne planification territoriale et une prise de décision la plus objective possible afin d'éviter, d'atténuer voire de compenser les impacts, et contribuer à la réalisation des objectifs nationaux en matière de biodiversité, en coordination avec les parties prenantes.

En effet il est crucial de disposer de données précises, fiables et accessibles, notamment cartographiques pour une gestion efficace de la biodiversité à Madagascar. Depuis 2020, une carte préliminaire de la Liste Rouge des Écosystèmes de l'UICN a été publiée, identifiant et évaluant 35 écosystèmes malgaches grâce à des données mises à jour et des approches innovantes. Parallèlement, le Schéma National des Orientations Sectorielles (SNOST, 2015-2025) vise à intégrer la dimension spatiale dans le développement, en distinguant les zones de croissance économique et les infrastructures vertes dédiées à la préservation de la biodiversité.

Ainsi, l'objectif de l'étude est d'étudier la faisabilité de production d'une typologie fine des écosystèmes pour et à l'échelle de Madagascar.

Plus spécifiquement :

- Identifier, examiner les cartes des écosystèmes et typologies d'habitats existantes à Madagascar, afin d'évaluer leur pertinence pour contribuer en tant que référentiels consensuels aux méthodologies et à la meilleure application possible de la hiérarchie d'atténuation et de mitigation dans le processus d'évaluation environnementale (EIES et EES).
- Formuler et établir des recommandations sur les principales étapes nécessaires à l'élaboration d'une typologie affinée et d'une carte consensuelle des écosystèmes à l'échelle nationale, ainsi qu'à l'élaboration de règles d'échanges utilisant cette nouvelle typologie fine.
- Identifier les principales lacunes et/ou incohérences dans l'ensemble des données d'écosystèmes existantes et formaliser des recommandations sur comment les compléter (études et expertises complémentaires, ...)

### 3. RESUME

Au cours de la mise en œuvre du projet COMBO+, l'étude a été lancée à travers une prestation de consultance durant l'année 2024 mais malheureusement les livrables n'ont pas pu être terminés en raison de l'indisponibilité des consultants. Une adaptation des travaux et des résultats préliminaires a donc été proposée pour finaliser ce livrable.

La présente note technique propose un bref état des lieux des travaux de typologie et cartographie à Madagascar permettant d'une part de mettre en évidence les spécificités de la diversité biologique de Madagascar due à son évolution particulière, et d'autre part d'identifier les lacunes principales des travaux de typologie et cartographie.

Les lacunes principales concernent plusieurs points dont le manque de couverture du territoire, le manque d'affinage ou de granularité, qui confirment le besoin d'un approfondissement des travaux de typologie afin d'obtenir une meilleure représentation de la diversité des écosystèmes de Madagascar.

Enfin, pour combler ces lacunes, une série de recommandations est proposée à la fois technique et méthodologique, en insistant sur le caractère collaboratif et participatif de l'approche, pour l'élaboration d'une typologie fine des écosystèmes de Madagascar.

## 4. ETAT DES LIEUX

### Définitions générales

Les typologies constituent un support essentiel pour tout programme consacré aux habitats et aux végétations. Elles servent de référentiel en apportant les noms et les définitions des types présents sur le territoire concerné. Elles facilitent la mise en œuvre des politiques publiques de conservation du patrimoine naturel en apportant de la cohérence dans l'acquisition des connaissances. En effet, elles établissent un langage commun et permettent l'interopérabilité entre programmes et l'homogénéité des données. En fonction des projets, les typologies utilisées peuvent varier, ce qui rend complexe la mutualisation des données issues de ces différents projets.

L'inventaire de ces projets est une étape essentielle à partir de laquelle des travaux d'harmonisation et de mise en correspondance sont nécessaires. En effet, les typologies nécessitent d'être inventoriées, mise en commun et harmonisées pour un langage commun et une efficacité la plus linéaire possible. C'est un travail qui bénéficie d'acquisition régulière de connaissances, et qui constitue donc un outil dynamique qu'il convient de régulièrement mettre à jour en conséquence.

La typologie et la cartographie des écosystèmes sont basées en général sur les caractéristiques climatiques, la géologie, la pédologie, les aspects géomorphologiques et topographiques, des critères biologiques (notamment taxonomiques) et les conditions écologiques y compris les facteurs anthropiques. Les typologies de végétation étant, elles, basées sur des données taxonomiques et phytosociologiques.

L'état des lieux est établi à partir du recueil bibliographique de documents sur la cartographie, la typologie et la description des écosystèmes de Madagascar, et synthétisés dans le résumé ci-après afin de comprendre les différents enjeux biogéographiques, climatiques, écologiques et taxonomiques de Madagascar. Le détail de l'état des lieux produit par le consultant est placé en annexe.

Madagascar, quatrième plus grande île du monde (592 040 km<sup>2</sup>), s'étend sur 1 587 km de long et présente une mosaïque de paysages et une biodiversité exceptionnelle, avec un taux d'endémisme d'environ 80 %. Sa position dans l'océan Indien, son relief contrasté et ses variations climatiques expliquent cette diversité écologique.



## Climat

Le climat malgache est dominé par le régime des pluies, avec une forte variabilité régionale :

- Est : climat tropical chaud et humide à forte pluviométrie influencée par les alizés, supportant la forêt dense humide (0–1800 m).
- Ouest : climat tropical chaud et sec avec deux saisons contrastées, marqué par la mousson ; forêts sèches caducifoliées et savanes (25–800 m).
- Sud et Sud-Ouest : climat tropical sec à subdésertique, 9 à 11 mois secs ; végétation xérophytique et forêts épineuses (5–500 m).
- Hautes Terres : climat semi-tropical à semi-tempéré humide (1200–2000 m), avec brouillards, crachins et nuits fraîches.

Les précipitations varient de moins de 0,3 m/an au Sud à plus de 2,5–7 m/an au Nord et à l'Est. La saison des pluies s'étend généralement de novembre à mars.

Köppen-Geiger climate classification map for Madagascar (1980–2016)

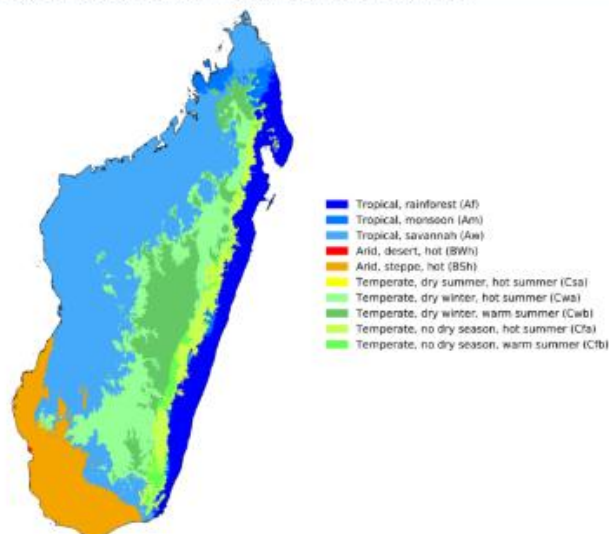


Figure 1 Carte climatique de Madagascar selon Köppen-Geiger (1980-2016)

## Géologie

La géologie malgache est issue d'une histoire ancienne et complexe. Elle est dominée par un socle précambrien métamorphisé représentant près des deux tiers de l'île, structuré en grands systèmes tels que l'Androyen, l'Antongil, le système du graphite ou du Vohibory. Ces formations témoignent d'orogénèses datées d'il y a jusqu'à 2,6 milliards d'années. Des intrusions granitiques et des épanchements volcaniques plus récents complètent cet ensemble. Les terrains sédimentaires se concentrent à l'Ouest, tandis que les roches cristallines dominent le Centre et l'Est.

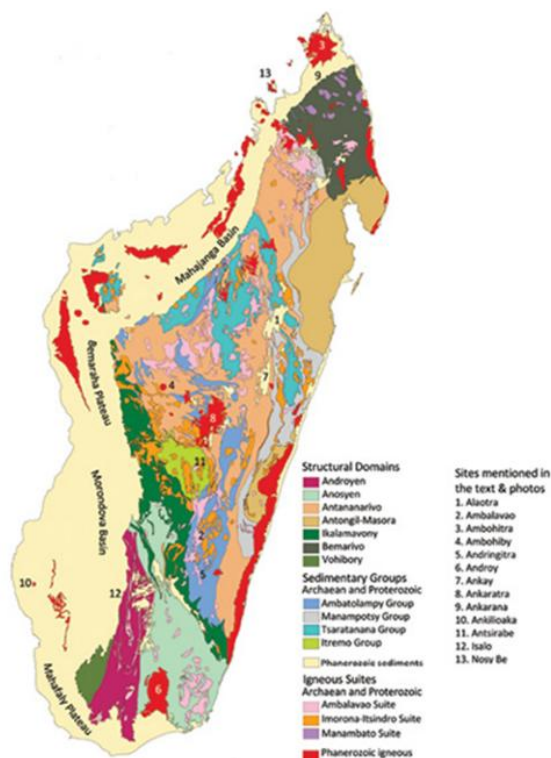


Figure 2 : Carte de Madagascar indiquant les principales unités géologiques (modifiée à partir de Roig et al., 2012) in Goodman et al. (2018)

## Pédologie

Les sols malgaches résultent de millions d'années d'évolution pédologique, mais restent très diversifiés selon la roche-mère, l'humidité, le relief et l'altitude.

- Est et Hautes Terres : sols ferralitiques (ferrasols et acrisols).
- Ouest, Sud et Sud-Ouest : sols sédimentaires variés (calcaires, sables, alluvions, ferrugineux, karsts...).

L'impact des perturbations naturelles (glissements, inondations, dépôts sédimentaires) mais surtout anthropiques (feux de brousse, cultures sur brûlis, déforestation) est conséquent, et a profondément modifié les sols, détruit leur microfaune et provoqué une perte de fertilité.

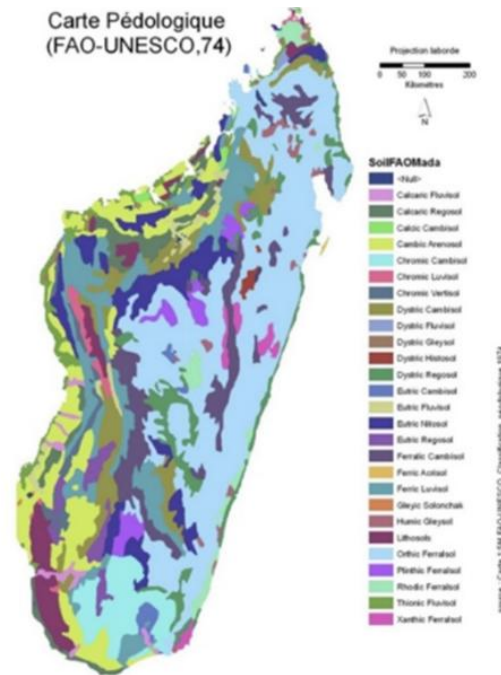


Figure 3 Carte des sols de Madagascar (FAO and UNESCO, 1974)

## Topographie et géomorphologie

Madagascar présente un relief très contrasté :

- Hautes Terres centrales,
- Plaines occidentales vastes et sablonneuses,
- Escarpements orientaux abrupts et forêts tropicales humides, menant à une étroite plaine côtière,
- Sud semi-désertique, dominé par les formations épineuses.

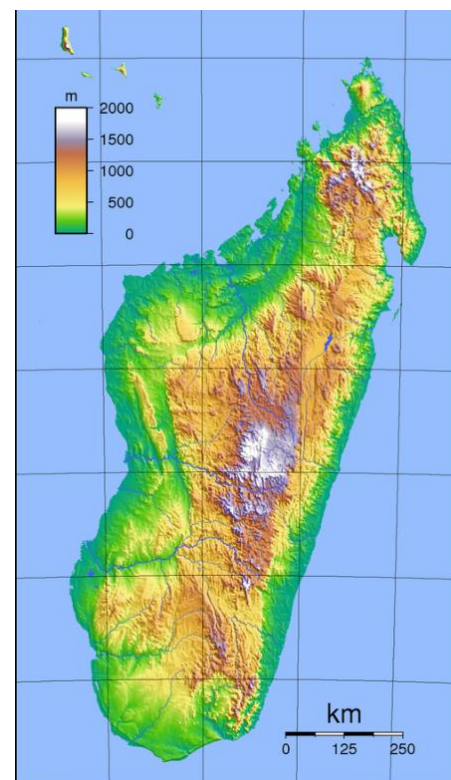


Figure 4 Carte topographique de Madagascar, Wikipedia, 2011

## Hydrologie

Le réseau hydrographique de Madagascar est composé de systèmes écologiques lenticques (Fleuves, Rivières et Ruisseaux) et lotiques (lacs, marais et marécages, lagunes, mangroves, etc...) divers est très inégalement réparti dans le Pays. La superficie totale des eaux continentales couvre environ 550.000 ha soit approximativement 1% de la surface de Madagascar. 197.000 ha de marais et rivières. Plus de 270.000 ha de mangroves. Madagascar dispose d'un large réseau hydrographique répartis sur cinq bassins versants. Le bassin Est accueille les fleuves Faraony, Mangoro, Manampatrana, Mananara, tandis que côté Ouest on trouve les fleuves Betsiboka Mangoky, Tsiribihina, Fiherena. Dans la partie Nord il y a les fleuves : Sambirano, Mahavavy, Loky, Besokatra, Irodo, Saharenana, Bemarivo, Lokoho.



Figure 5 Carte hydrographique de Madagascar (BD500 FTM, 2009)



## 5. CLASSIFICATION ET CARTOGRAPHIE

### 5.1. Le cas spécifique de l'évolution et diversité biologique à Madagascar

La diversité biologique de Madagascar résulte d'un long processus de spéciation, né de l'interaction complexe entre de nombreux facteurs éco-géographiques. Au fil des temps géologiques, le relief montagneux et fortement disséqué de l'île, la grande variété de conditions climatiques, ainsi que la diversité des substrats et des sols liés à une géologie particulièrement complexe, ont façonné une mosaïque d'environnements favorisant l'adaptation locale et l'isolement des populations. Ces conditions exceptionnelles ont entraîné une diversification remarquable des espèces, faisant de Madagascar l'un des hauts lieux mondiaux de l'endémisme. Les mêmes facteurs expliquent la richesse et la variété des types de végétation et d'écosystèmes que l'on y observe aujourd'hui (Goodman et al., 2018).

S'étendant entre 11°57' et 25°36' de latitude Sud, Madagascar présente une amplitude écologique considérable : les précipitations varient de 400 à plus de 3 300 mm par an, la durée de la saison sèche peut aller de 0 à 12 mois, et les températures fluctuent selon l'altitude, qui s'échelonne du niveau de la mer jusqu'à 2 876 m. La diversité des roches-mères, couvrant l'ensemble des grands types géologiques connus, contribue encore à la complexité du milieu. Ce contexte a permis l'émergence d'une flore et d'une végétation d'une richesse et d'une originalité exceptionnelles, organisées en communautés écologiques reflétant cette diversité environnementale hors du commun.

Chaque aire protégée ayant souvent été décrite par des auteurs différents, l'harmonisation des terminologies et des classifications est indispensable pour garantir la cohérence et la comparabilité des données à l'échelle nationale. **Dans un tel contexte, définir une typologie commune et consensuelle de la végétation revêt une importance majeure.** L'adoption d'un système de référence simple, rigoureux et partagé constitue donc une étape essentielle pour assurer l'intégrité scientifique du travail. Divers systèmes de classification ont été proposés au fil du temps, selon les approches, les moyens et les sensibilités des auteurs. Les synthèses de Lowry et al. (1997) ainsi que de Gautier et Goodman (2003, 2008) constituent à cet égard des références majeures qui ont servi de base pour la présente étude.

### 5.2. Etat des lieux des travaux de classification des écosystèmes et cartographie de végétation à Madagascar

Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, plusieurs travaux de classification et de cartographie de la végétation malagasy se sont succédé, chacun apportant des avancées méthodologiques et de nouvelles échelles d'analyse. Voici un résumé de leurs apports principaux :

Année	Auteur(s)	Titre / nature des travaux	Apports principaux et choix de classification
1889-1890	Richard Baron	Première classification et cartographie (trois grandes régions : Est / Centre / Ouest)	Division floristique territoriale simple fondée sur essentiellement sur des critères floristiques et géographiques (distribution des espèces, relief, physiognomie de la végétation)
1921	Henri Perrier de la Bâthie	« La végétation malgache »	Première grande classification écologique des types de végétation Introduction d'un découpage en deux grands ensembles phytogéographiques : la « Flore au vent » (région orientale, centrale, Sambirano) et la « Flore sous le vent » (région occidentale et méridionale)

1955 / 1965	Henri Humbert	Classification phytogéographique et cartographie basée sur photo aérienne (1950s)	Distinction d'étages altitudinaux, des exposition est/ouest, séparation des zones sud, cartographie plus précise.
1971 / 1974	Jean Louis Guillaumet. & Jacques Koechlin	Synthèse sur la végétation malgache	Adaptation des systèmes antérieurs aux typologies végétales tropicales définies à l'échelle africaine (accord de Yangambi sur la nomenclature des types de végétation africains, Aubréville, 1957), consolidation de la typologie. Classification structurée par formations, sur des bases écologiques et floristiques
1976	Alain Cornet & Jean Louis Guillaumet J.-L.	« Divisions floristiques et étages de végétation à Madagascar »	Distinction des faits floristiques vs écologiques ; ajustement et affinement des étages et domaines.
1983	Frank White	The Vegetation of Africa	Intégration de Madagascar dans une cartographie continentale, basé sur les critères physiognomie-structure.
1995	Faramalala M. H. A.	Cartographie à partir d'images satellites (premières)	Mise à jour des couvertures, prise en compte de la dégradation, images satellite, en reprenant la classification d'Humbert
1996	David Du Puy & Justin Moat	« A refined classification of the primary vegetation of Madagascar based on the underlying geology »	ont combiné cartographie de la végétation et géologie simplifiée pour analyser la relation substrat-végétation via SIG mis en évidence via SIG. Identification d'unités écologiques uniques selon substrat
2007	Justin Moat & Smith P.	Atlas de la végétation de Madagascar	synthétise les travaux antérieurs (Humbert, Faramalala, Du Puy & Moat), propose une légende de végétation et structure nationale récente, légende simplifiée selon zones humides/sèches.
2008–2010	Programme CEPF	Madagascar Vegetation Mapping Project	Nouvelle cartographie nationale fondée sur télédétection et validation terrain
2013	Sayre et al., Association of American Geographers	Carte des écosystèmes terrestres d'Afrique (incluant Madagascar)	Application de typologies globales, hiérarchisation par fonction écologique.

*Tableau 1 Principaux travaux de classification et de cartographie des écosystèmes de Madagascar*

Chacun de ces travaux a permis d'affiner la compréhension des formations végétales à Madagascar, d'augmenter l'échelle de cartographie, de diversifier les critères (flore, physiognomie, climat, géologie) et de poser les bases d'une typologie nationale cohérente. Toutefois, les divergences entre systèmes, les différences d'échelle et les méthodes variées rendent l'élaboration d'une typologie consensuelle un exercice complexe mais essentiel.

## 5.3. Classification et typologie selon l’UICN

### 5.3.1. La classification globale UICN

Le GET (Global Ecosystem Typology, UICN) organise les écosystèmes en 6 niveaux hiérarchiques. Chaque niveau a un rôle précis allant du comparatif mondial aux entités locales utiles aux décisions. Il sera utile d’identifier à partir de quel niveau la classification est pertinente pour l’application opérationnelle de la hiérarchie d’atténuation, et si les connaissances actuelles permettent de définir clairement ces niveaux à Madagascar :

- **Niveau 1 : Domaine**

Le premier niveau est une séparation large selon le milieu : Terrestre, Marin, Eau douce, Souterrain.

- **Niveau 2 : Biome fonctionnel**

Il s’agit des grands ensembles fonctionnels partageant régime hydrique/climatique et rôle structural. Par exemple : forêt tropicale humide, désert xérophile, récif corallien.

Ce niveau permet d’orienter les types d’indicateurs pertinents (par exemple l’humidité et canopée pour forêts pluviales ; la salinité et couverture corallienne pour récifs).

- **Niveau 3 : Groupes fonctionnels d’écosystèmes**

C’est la subdivision du biome par fonctionnement ou physiologie.

Par exemple pour Madagascar : Forêts denses humides (basse vs moyenne altitude) ; Forêts de Tapia (groupe particulier lié au feu et aux espèces) ; Mangroves (groupe intertidal).

Ce niveau rapproche de la réalité opérationnelle et permet d’appliquer des règles communes, par exemple des seuils de perte de couverture, au sein d’un groupe.

- **Niveau 4 : Sous-groupes régionaux d’écosystèmes**

C’est la déclinaison régionale d’un groupe fonctionnel, qui prend en compte le contexte biogéographique local. C’est le niveau où la typologie mondiale devient spécifique au pays.

Par exemple pour les forêts humides de basse altitude : le sous-groupe Est humide ; pour les forêts sèches : le sous-groupe Ouest, Nord-Ouest, Sud-Ouest.

- A ce stade l’application de la hiérarchie d’atténuation peut commencer à avoir du sens car le niveau permet un screening rapide et donc une identification des écosystèmes prioritaires

- **Niveau 5 : Types d’écosystèmes globaux**

C’est l’unité écologique fonctionnelle et spatiale clairement identifiable (combinaisons abiotiques + biotiques).

Par exemple « forêts denses humides de basse altitude de l’Est », ou « herbiers marins du Nord-Est ».

- Avec ce niveau il est possible de définir des seuils quantitatifs relativement précis telle que l’aire minimal, la fragmentation acceptable etc. qui seraient pertinent pour la hiérarchie d’atténuation

- **Niveau 6 : Sous-types d’écosystèmes globaux**

Ce niveau définit les entités locales de manière précises en incluant les variantes de microclimat ou de substrat spécifique.

Par exemple pour Madagascar : « Forêt de Tapia d’Andringitra (sur substrat gréseux) », « Tsingy d’Ankarana (karstique) », « marais d’Alaotra » en tant que sous-type.

- A ce stade peuvent s’appliquer les décisions fines pour la hiérarchie d’atténuation : pour l’évitement ou la définition de critères de compensation bien localisés.
- Ce niveau reste à définir opérationnellement et serait un idéal à atteindre progressivement pour application fine de la hiérarchie d’atténuation

### 5.3.2. La liste rouge des écosystèmes à Madagascar selon UICN

Les travaux d'Aurélien Carré et al. (2020) ont marqué une avancée majeure avec la première application des critères de la Liste Rouge des Écosystèmes (LRE) de l'UICN à Madagascar. Les critères de la LRE sont inspirés de ceux de la Liste Rouge des espèces, mais adaptés aux écosystèmes. Ils évaluent le risque d'effondrement (perte de fonctionnalité écologique, réduction drastique de la superficie, ou transformation irréversible). Cette étude, menée en collaboration avec des experts malgaches et internationaux, a permis d'évaluer l'état de conservation des écosystèmes terrestres, côtiers et marins de l'île.

L'étude caractérise ainsi l'état de 36 écosystèmes identifiés à Madagascar (terrestres, côtiers, marins). Cette classification des types d'écosystèmes correspond au niveau 5 : "Types d'écosystèmes globaux" du GET vu précédemment.

#### Sources principales

L'étude s'est basée sur les travaux de classifications et cartographies existants, donc une combinaison d'approches historiques, biogéographiques, botaniques et géomorphologiques.

On retrouve les travaux cités suivants :

- |  |  |
|--|--|
| - Baron (1889) – The Flora of Madagascar   | <i>Données récentes et validation spatiale :</i>   |
| - Perrier de la Bâthie (1921) – La végétation malgache   | - Harper et al. (2007) - Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar   |
| - Humbert & Cours-Darne (1965) – Carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques | - Projet financé par le Critical Ecosystem Partnership Fund (CEPF), « Madagascar Vegetation Mapping » : utilisation d'imagerie et teledetection          |
| - Koechlin, Guillaumet & Morat (1974) – Flore et végétation de Madagascar                            |  |
| - White (1983) – Vegetation of Africa  | <i>Milieux marins et côtiers :</i>   |
| - Faramalala (1995) – Carte de la végétation de Madagascar (SIG)                                     | - WIOMER (2012) – Western Indian Ocean Marine Ecoregions : subdivision biogéographique du littoral malgache (Nord-Est, Est, Sud, Sud-Ouest, Nord-Ouest). |
| - Du Puy & Moat (1996) – Vegetation mapping project  | - Obura et al. (2011), Andriamalala (2007), Maharavo (2002), etc. : typologies des récifs, mangroves et herbiers.  |

#### Méthodologie

La méthodologie utilisée pour définir ces 36 types écosystèmes a suivi plusieurs étapes, réflexions, concertations avec les experts malagasy et arbitrages que nous essaierons de représenter ici :

##### Étape 1 : Compilation et comparaison des typologies existantes

- Revue systématique des cartes, classifications, données de terrain.
- Identification des formations redondantes, mal définies ou contradictoires en priorisant les données les plus récentes.
- Sélection des descripteurs écologiques communs : climat, altitude, substrat, structure végétale, composition floristique, et hydrologie.

##### Étape 2 : Définition des grands ensembles écologiques

- Découpage du territoire en biomes climatiques :
  - o Est humide,
  - o Hautes Terres,
  - o Ouest subhumide à sec,
  - o Sud et Sud-Ouest xérique.
- Ces biomes correspondent aux régions floristiques historiques.
- Écosystèmes marins/côtiers : cours d'eau, marais, lacs, eaux souterraines, mangroves, herbiers, récifs, lagunes et estuaires (selon WIOMER 2012).

### Étape 3 : Délimitation des unités écologiques

- Les unités ont été délimitées en croisant les descripteurs dont :
  - o la physionomie (forêt dense, fourré, brousse, savane, etc.) ;
  - o la composition floristique dominante (ex. Tapia) ;
  - o le substrat géologique (latérite, calcaire, sable, cuirasse ferrugineuse) ;
  - o la position topographique / altitudinale (basse, moyenne, haute altitude).
- Chaque combinaison a produit une entité écologique homogène

### Étape 4 : Validation spatiale par télédétection et experts

- Les limites des unités ont été ajustées en superposant les couches (Faramalala, CEPF) et validées par des observations terrain
- Validation par ateliers nationaux réunissant notamment l'UICN, CNRE, MBG, universités.
- Chaque unité a été documentée (description, coordonnées, extension approximative).

### Étape 5 : Inclusion des milieux particuliers

- Ajout d'écosystèmes non cartographiés dans les cartes de végétation classiques : systèmes karstiques des Tsingy, inselbergs, végétation saxicole, etc.

## Critères pour une entité écologique

Grace à ces étapes, des critères pour définir une unité ou entité écologique homogène ont été établis :

Type de critère	Indicateurs
Climatique	Pluviométrie, température moyenne, saisonnalité
Topographique / Altitudinal	Plaines côtières, moyennes altitudes, Hautes Terres, reliefs karstiques.
Édaphique / Géologique	Nature du sol (latérite, sable, cuirasse ferrugineuse, substrat calcaire).
Physionomique	Structure de la végétation : forêt dense, fourré, brousse, savane, herbier, mangrove, récif.
Floristique / Faunistique	Espèces dominantes ou endémiques caractéristiques (Tapia, etc.).
Hydrologique	Influence de l'eau douce, salinité, marées, nappe phréatique.
Fonctionnel / Dynamique	Processus dominants : feu, régénération, érosion, sédimentation, influence marine.
Spatialisé	Aire continue identifiable sur carte, SIG, cohérente biogéographiquement.



## Résultat

36 écosystèmes identifiés à Madagascar :

### A) Écosystèmes terrestres et zones humides continentales (23)

#### Forêts et formations forestières

1. Forêts littorales de l'Est
2. Forêts denses humides de basse altitude de l'Est
3. Forêts denses humides de moyenne altitude de l'Est
4. Forêts denses humides de haute altitude de l'Est et des Hautes Terres centrales
5. Forêts azonales de l'Est sur cuirasses ferrugineuses
6. Forêts humides de l'Ouest
7. Forêts subhumides de l'Ouest
8. Forêts galeries ou rivulaires
9. Forêts de Tapia

#### Forêts sèches et fourrés

10. Forêts sèches de l'Ouest
11. Fourrés et forêts sèches épineuses sur sables roux et calcaires du Sud et Sud-Ouest

#### Brousses et fourrés

12. Fourrés xérophiles du Sud et Sud-Ouest
13. Brousses littorales du Sud-Ouest
14. Brousses et fourrés éricoides des Hautes Terres

#### Formations herbeuses

15. Formations herbeuses secondaires de l'Est (*roranga*)
16. Savanes de l'Ouest et des Hautes Terres centrales

#### Milieux rocheux et montagnards

17. Système karstique des *Tsingy*
18. Végétation saxicole des massifs rocheux
19. Inselbergs

#### Milieux aquatiques continentaux

20. Cours d'eau (fleuves, rivières, ruisseaux)
21. Lacs et étangs
22. Marais d'eau douce
23. Eaux souterraines

### B) Écosystèmes marins et côtiers (13)

#### Récifs coralliens

24. Récifs du Nord-Est
25. Récifs de l'Est
26. Récifs du Sud
27. Récifs du Sud-Ouest et de l'Ouest
28. Récifs du Nord-Ouest

#### Herbiers marins

29. Herbiers des côtes Nord-Est
30. Herbiers des côtes Nord-Ouest
31. Herbiers des côtes Sud-Ouest
32. Herbiers des côtes Est

#### Mangroves et estuaires

33. Mangroves du Nord-Ouest
34. Mangroves de la côte Ouest
35. Estuaires et deltas de la côte Ouest

#### Systèmes lagunaires

36. Système lagunaire du littoral de Madagascar

Liste rouge des écosystèmes de Madagascar (UICN, 2020)

## Evaluation de l'état des écosystèmes

L'évaluation de l'état de conservation de ces 36 écosystèmes est réalisée ensuite suivant 5 critères principaux avec des seuils quantitatifs :

- A. La réduction de la distribution spatiale (perte de superficie) sur différentes périodes.
- B. La distribution spatiale restreinte (petite aire géographique) + déclin ou menaces.
- C. La dégradation de l'environnement physique (paramètres abiotiques : sol, eau, climat).
- D. La perturbation des processus biotiques (interactions espèces, fonctions écologiques).
- E. La modélisation des risques (combinaison de menaces pour estimer la probabilité d'effondrement).

À Madagascar, ce sont les dynamiques spatiales (critères A et B) qui ont été évaluées principalement, faute de séries de données pour les critères C, D et E. Les catégories de menace (CR, EN, VU, etc.) sont donc provisoires, fondées sur la régression de surface et la fragmentation.

## 6. LACUNES IDENTIFIEES

Les lacunes identifiées sur l'ensemble des travaux de typologie et cartographie résultent des analyses et des avis d'experts.

### **Imprécisions, affinage et couverture trop limités**

Les travaux de classifications récents dépendent largement des compilations de l'ensemble des ressources historiques, donc les imprécisions peuvent être répercutées sur les résultats finaux. Une des lacunes majeures est aussi le manque de couverture totale du territoire malgache impliquant des zones où les lacunes de données sont importantes.

De manière générale si l'on se place dans la conception des niveaux du GET, la classification proposée par la LRE est consensuelle au moins jusqu'au niveau 4 dans la proposition des sous-groupes régionaux d'écosystèmes, puis à partir du niveau 5 il y a des remarques, des incohérences ou contradictions à soulever, mais surtout un nombre final très limité d'écosystèmes avec seulement 36 types alors que les mêmes classifications pour le Mozambique par exemple atteignent 160 types d'écosystèmes terrestres par exemple. Il semble néanmoins qu'il s'agit de besoins d'approfondissement mais non pas de remise en question de la méthodologie portée par LRE qui peut servir de base au travail d'élaboration de référentiels d'habitats et de végétation plus précis.

### **Découpages altitudinaux peu consensuels**

La dernière version de l'Atlas de végétation (Moat et Smith, 2007) est la plus récente et la plus souvent utilisée pour les écosystèmes malagasy, notamment par la LRE. Mais les seuils altitudinaux proposés (0-400, 400-800, 800-1200, 1200-1800, 1800-2000, >2000 m) sont assez arbitraires et non validés sur le terrain, et peuvent générer des incohérences vis-à-vis d'autres facteurs influents tels que le microclimat local (exemple l'exposition au vent, la topographie, l'assemblage d'espèces). Par exemple la LRE utilise ces seuils pour définir 3 écosystèmes distincts de forêts denses humides (basse, moyenne et haute altitude), mais si les limites d'altitudes ne sont pas correctes alors la superficie estimée sera aussi erronée, et étant donné que la LRE évalue les menaces en fonction de la régression de la superficie de ces écosystèmes, la menace pourrait être sous-estimée. Ici, l'importance des descriptions de végétations et cortèges spécifiques est souvent la clé pour définir de façon optimale des zonages altitudinaux cohérents par grand ensembles tels que les forêts denses humides.

### **Granularité insuffisante et prise en compte des mosaïques ou habitats linéaires**

Des entités écologiques sont de petite taille ou dans une répartition en mosaïque ou en ruban, ne permettent pas d'être identifiés sur des cartes classiques. Il s'agit par exemple des forêts galeries, des marais, de petites zones humides, îlots littoraux, inselbergs, Tsingy, des écosystèmes d'altitude et micro-habitats, qui peuvent avoir une forte valeur patrimoniale ou écologique.

Par exemple les forêts sèches de l'Ouest comprennent souvent des mosaïques forêt-savane or, dans la carte RLE, elles apparaissent comme une seule unité homogène.

- **Certains micro-habitats rares, essentiels pour la biodiversité, risquent d'être sous-évalués ou non considérés dans les analyses d'impact et de compensation.**

### **Variabilité des fourrés xérophiles / forêts épineuses**

Les fourrés xérophiles et forêts épineuses du Sud et Sud-Ouest de Madagascar présentent une grande hétérogénéité structurale : certaines sont denses, d'autres claires ou rabougries, selon les conditions édaphiques, la salinité, la topographie ou la fréquence des feux. La LRE regroupe ces formations sous un seul type, sans distinguer ces variantes physiologiques.

### **Formations anthropiques et prairies dégradées mal classées**

Les formations anthropiques (cultures, savanes issues de défrichements, prairies de brûlis récurrents « tavy ») ne sont pas systématiquement distinguées des formations naturelles. Ces formations ne sont pas incluses dans la LRE et dans d'autres classifications elles apparaissent parfois comme des écosystèmes à part entière, alors qu'elles devraient plutôt être considérées comme des états dégradés d'écosystèmes naturels (forêts, savanes, etc.).

- Un attribut d'état écologique serait crucial pour la HA, les gains de biodiversité étant potentiellement maximisés sur des milieux dégradés.

### **Données et sources cartographiques obsolètes ou hétérogènes**

De manière générale, les données géologiques, pédologiques et de végétation utilisées sont anciennes et hétérogènes. Or, le substrat géologique influence fortement la végétation. Les couches actuelles ne permettent pas d'analyser finement ces différences.

### **Données temporelles limitées**

L'application des critères UICN, notamment le critère A sur la réduction de superficie, nécessite des séries temporelles longues et homogènes (de 20 à 50 ans). Or, à Madagascar, les séries sont fragmentées, et il existe peu de mises à jour régulières après 2015.

### **La connectivité et dynamique du paysage peu prise en compte**

La connectivité écologique (corridors, continuité forestière, perméabilité du paysage) et la fragmentation spatiale ont été peu intégrées dans les analyses de la LRE. Pourtant, ces éléments conditionnent la résilience d'un écosystème face aux perturbations.

- Disposer de la vision connectivité et dynamique de paysage pour la planification de la HA et de la compensation serait hautement bénéfique à son application efficace.

## 7. RECOMMANDATIONS POUR L'ELABORATION D'UNE TYPOLOGIE FINE DES ECOSYSTEMES/HABITATS ET VEGETATIONS A MADAGASCAR

Les principales recommandations pour une typologie fine qui définirait le niveau 6 du GET “sous-types d'écosystèmes globaux” de manière opérationnelle et utile pour la HA sont ainsi les suivantes :

- **Définition de végétations propres aux écosystèmes**  
De façon à disposer d'une vision la plus harmonisée possible des écosystèmes caractérisés, il serait indispensable de formaliser, en plus des couches cartographiques, des cahiers d'habitats qui, au-delà de leurs descriptions écosystémiques physiques (climat, altitude, géologie, pédologie, ...), présenteraient les cortèges de végétation types (taxonomie générale et espèces indicatrices, ...) et leur structures (physionomie et phytosociologie<sup>1</sup>). Le cadre descriptif permettant de poser les bases d'un modèle qui permettra aussi de disposer d'une part d'un langage commun et d'autre part d'identifier les besoins de cohérence et d'harmonisation descriptive.
- **Compléter les données descriptives**  
Mener des campagnes d'acquisition de connaissance sur des zones à fortes lacunes de connaissance permettrait d'augmenter la couverture de connaissance à l'échelle nationale et de réduire les « zones blanches ». Une stratégie d'acquisition de données pourrait structurer et prioriser ces travaux
- **Meilleure prise en compte de découpages altitudinaux empiriques**  
Définir ces découpages qui doivent être testés avec la distribution d'espèces indicatrices et gradient climatique. Il serait opportun pour ce faire de définir des bandes altitudinales adaptatives basées sur analyses de biodiversité (par exemple où les assemblages floristiques changent significativement) plutôt que des blocs fixes.
- **Prise en compte accrue de la forte variation des conditions écologiques, et la diversité des microclimats**  
Ce travail est fondamental pour éviter de négliger des microhabitats dont certains présentent des enjeux de conservation maximum au sein de grands ensembles actuellement décrits. Pour cela, prioriser des inventaires locaux pour générer les couches et des descriptions dédiées pourrait faire partie des priorités en termes d'acquisition de connaissance fine.
- **Prise en compte affinée de la nature des substrats**  
En complément d'une meilleure prise en compte des découpages altitudinaux, la prise en compte de la nature des substrats est également importante (socles géologiques et substrats pédologiques) pour préciser les délimitations des écosystèmes (ce travail sera ensuite croisé avec les analyses de climats et de végétation).
- **Prise en compte actualisée et évolutive des formations anthropiques et prairies dégradées**  
L'état de conservation des éléments décrits est essentiel, y compris dans des zones dégradées portant justement un haut potentiel de restauration écologique. Introduire une attribution d'état écologique ou de conservation tels que naturel/dégradé anthropique/etc. pour ces types d'écosystèmes (cultures, savanes issues de défrichements, prairies de brûlis récurrents) et établir un lien ou une relation avec un écosystème naturel “parent”, dont il est issu, afin de pouvoir analyser la valeur écologique résiduelle, la possibilité de restauration, la priorité d'évitement ou de compensation serait hautement utile. Cette considération permettrait aussi de compléter la couverture des zones non évaluées par la LRE.

---

<sup>1</sup> Les végétations comme grille de lecture des habitats naturels, Conservatoire Botanique National de Bailleul, (<https://www.cbnbl.org/vegetations-grille-lecture-habitats-naturels>)

➤ **Intégration des notions de connectivité et dynamique du paysage**

Trop souvent négligés, ces notions sont pourtant potentiellement très utiles, au-delà de la compréhension écologique d'ensemble, pour établir des priorités de conservation et/ou de restauration écologique et mériteraient donc d'intégrer en tant que critères les méthodologies harmonisées à produire.

➤ **Proposer une méthodologie consolidée et harmonisée, avec des descripteurs plus précis**

Afin de prendre en compte les recommandations précédentes, une méthodologie consolidée et harmonisée doit être développée. Des descripteurs plus précis peuvent être développés pour caractériser et différencier les écosystèmes dans une typologie fine/de niveau 6. Les critères utilisés par la LRE pour définir une entité écologique (cf partie 532) doivent ainsi être complétés pour intégrer les éléments recommandés. Le développement des descripteurs pourrait intégrer les principes suivants :

- Pertinence écologique
  - ➔ Prise en compte de la haute valeur écologique (espèces indicatrices, endémiques, rareté, menacée)
  - ➔ Prise en compte des fonctionnalités écologiques (services écosystémiques)
  - ➔ Prise en compte de la connectivité (corridors, fragmentation du paysage)
  - ➔ Prise en compte du potentiel de restauration écologique
- Mesurabilité, reproductibilité
- Echelle appropriée
- Temporalité

➤ **Pérenniser une approche collaborative et participative indispensable**

L'élaboration d'une typologie fine et consensuelle des écosystèmes et végétations nécessite une approche collaborative et participative, afin d'établir des méthodologies et langages communs d'obtenir des résultats partagés, pertinents et faisant office de référentiel commun. De ces résultats, une vision à la fois précise et à l'échelle stratégique peut émerger et ainsi mieux adresser les actions de conservation ou de restauration écologiques.

A l'image de l'approche menée lors de la LRE, cette approche concertée est fondamentale et essentielle. L'implication d'experts malgaches et internationaux, l'inclusion des connaissances de terrain des communautés locales, les concertations locales et nationales, sont absolument nécessaires, et ce pour chaque étape, ainsi qu'un pilotage et une coordination adaptés.

L'élaboration d'une la typologie fine d'écosystèmes/habitats/végétations doit également bénéficier de synergies avec des travaux menés dans ce domaine au travers de différents projets et initiatives existants, ainsi que via la mise en place de projet pilotes collaboratifs. De cette manière, les travaux y gagneraient en ampleur et technicité, tout en répondant à l'enjeu d'une approche collaborative et harmonisée.

Enfin, et compte tenu des lacunes existantes, du besoin d'acquisition quasi continu de connaissances fondamentales (de délimitation, taxonomiques, phytosociologiques, évolution de l'état de conservation, ...), le travail collaboratif doit être pérennisé. Les évolutions de typologies sont normales et fréquentes, y compris sur des territoires bien connus. Disposer de méthodologies partagées et harmonisées est une base fondamentale et essentielle à des travaux qui seront régulièrement mis à jour et complétés au fur et à mesure de l'acquisition de connaissance brute et fonctionnelle des écosystèmes et végétations.

Un pilotage et une coordination de haut niveau doivent nécessairement être structurés et assurés durablement pour établir une communauté de parties-prenantes disposant de fortes compétences scientifiques et techniques.



## 8. ANNEXE

### 8.1. Etat des lieux du territoire de Madagascar

La typologie et la cartographie des écosystèmes sont basées en général sur les caractéristiques climatiques, la géologie, la pédologie, les aspects géomorphologiques et topographiques et les conditions écologiques y compris les facteurs anthropiques.

Les résultats recueillis sont établis à partir du recueil bibliographique de documents sur la cartographie, la typologie et la description des écosystèmes de Madagascar. Et ils sont compilés et font l'objet d'une synthèse pour la présentation et la discussion auprès des experts et techniciens spécialistes issues des réunions techniques successives effectuées. Ainsi, les informations ci-après ont été présentées afin de comprendre les différents enjeux biogéographiques, climatiques, écologiques et taxonomiques de Madagascar.

Madagascar est située entre 11°57' et 25°30' de Latitude Sud et entre 43° 14' et 50° 27' de Longitude Est, à cheval sur le Tropique du Capricorne. Madagascar se trouve dans l'hémisphère sud, dans la partie Sud-Ouest de l'Océan Indien. Elle est séparée à 400km de la côte Sud-Est de l'Afrique par le Canal du Mozambique. Surnommée aussi la « grande île », elle est la quatrième île du monde en superficie (592 040 km<sup>2</sup>) après le Groenland, la Nouvelle-Guinée et Bornéo. Ainsi, du Cap d'Ambre au Nord au Cap Sainte-Marie au Sud, elle s'étire sur une longueur de 1.587 km et 500 km environ de large d'Est en Ouest. Du fait de son relief et de son climat, Madagascar réunit une véritable mosaïque de paysages naturels ainsi qu'une exceptionnelle biodiversité (Hotspot et Megadiversité) dans sa faune (Vertébrés et Invertébrés) et sa flore (Phanérogames et Cryptogames). Elle est caractérisée par un important taux d'endémisme soit 80 % des espèces vivantes sauvages sur l'île qui n'existent nulle part ailleurs.

#### 8.1.1. Caractéristiques climatiques

Comme dans toute région tropicale, les divisions climatiques à Madagascar sont basées sur le régime des pluies. On peut ainsi noter des régions sans saison sèche, des régions à deux saisons (une sèche, l'autre humide ou plus humide et moins humide) et des régions uniformément ou relativement sèches.

Madagascar présente en général, une diversité des conditions climatiques avec des paysages particuliers et diversifiés selon les sols, le relief, l'altitude et l'exposition géographique.

**La partie Est de l'île :** sur la côte orientale se présente un climat tropical chaud et humide, à forte pluviométrie influencée par l'Alizé (vent du secteur Sud et Sud-Est de Madagascar) tout au long de l'année. Il s'agit de la région la plus pluvieuse du pays, caractérisée par la forêt dense humide sur sols latéritiques humifères entre 0 et 1800m d'altitude.

**La partie Ouest :** la côte occidentale est caractérisée par un climat tropical chaud et sec, avec deux saisons contrastées (saison sèche et saison humide), à période de pluies limitée pendant la saison humide de Novembre à Mars de l'année, conditionnée par la Mousson (vent du secteur Nord-Ouest de Madagascar). La végétation naturelle est caractérisée par la forêt dense sèche caducifoliée et les savanes sur différents types de sols généralement sédimentaires (sables, alluvions, calcaires, massifs karstiques, ferrugineux rouges tropicaux, gréseux, etc...) entre 25 et 800m d'altitude.

**La partie Sud et Sud-Ouest :** étant presque exemptée de pluies. Le climat y est tropical sec, presque aride à subdésertique avec plusieurs mois secs (9 à 11 mois), et les températures varient entre 6°C et 40°C pendant l'hiver et l'été. La végétation est en général "coralliforme" sous forme de bush xérophytique, relativement complexe et hétérogène avec des fourrés secs xérophiles et forêts épineuses sur sols sédimentaires (sables roux et calcaires massifs et/ou détritiques) entre 5 et 500m d'altitude.

**La partie Centre de l'île :** la partie des Hautes Terres, dispose d'une altitude nettement supérieure (entre 1200 et 2000 mètres d'altitude), caractérisée par de climat semi-tropical à semi-tempéré humide avec des brouillards et crachins. Les formations végétales correspondantes sont de forêts humides à sclérophylles sur sols latéritiques humifères. Des pluies estivales existent et surtout, les nuits peuvent être très fraîches et venteuses entre Juin et Août.

**Sur le reste de l'île,** la saison des pluies débute généralement entre Novembre et Décembre et s'étend jusqu'à Mars. Le Nord et le Nord-Ouest de Madagascar sont les plus touchées par la Mousson (vent du secteur Nord-Ouest de Madagascar). C'est aussi à ce moment-là de l'année que les températures sont les plus élevées, elles avoisinent les 35°C.

Différentes cartes climatiques peuvent être indiquées suivant différents auteurs avec des informations détaillées.

Köppen-Geiger climate classification map for Madagascar (1980-2016)

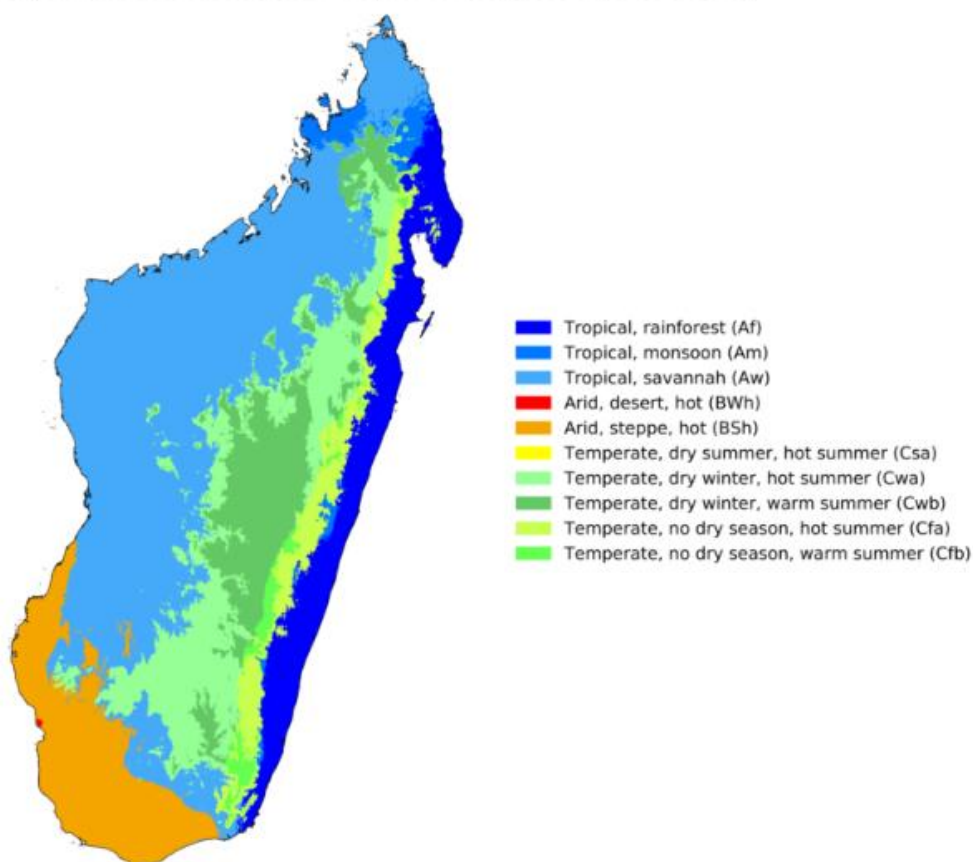
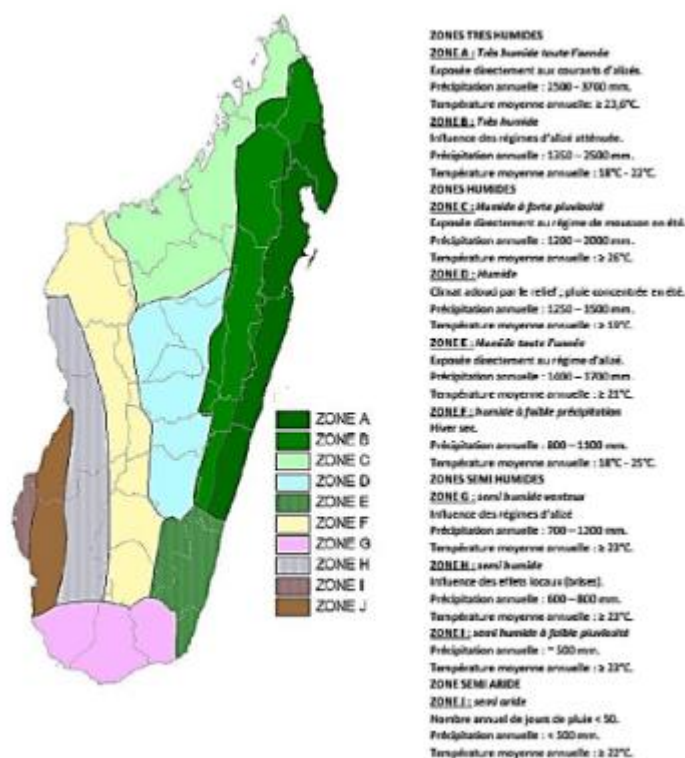


Figure 6 : Carte climatique de Madagascar selon Koppen-Geiger (1980-2016)



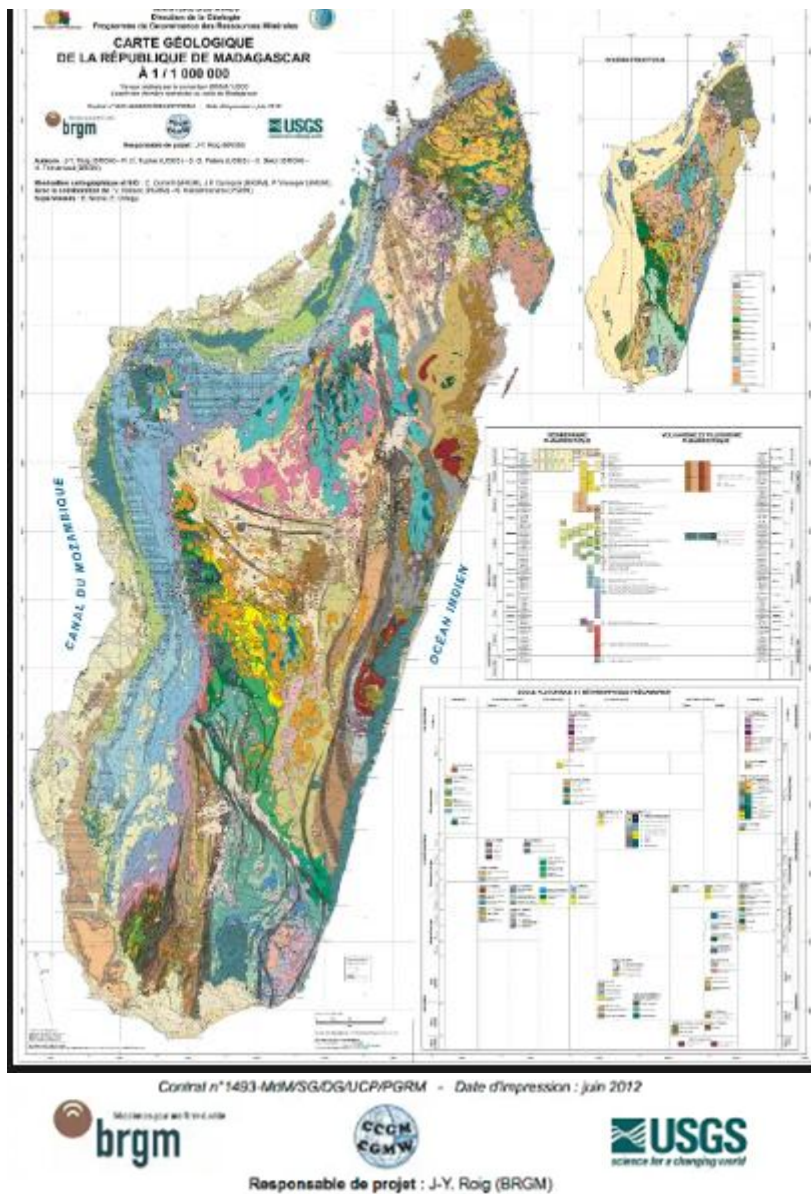
Délimitation climatique de Madagascar (source: DGM)

Figure 7 : Carte de délimitation climatique établie par DGM

### 8.1.2. Géologie de Madagascar

Décrite pour la première fois par William Buckland en 1821, la géologie de Madagascar n'a fait l'objet d'aucune étude systématique avant le XXème siècle. Depuis les années 1920, les chercheurs ont apporté des connaissances de plus en plus détaillées sur les roches de l'île (e.g., Lacroix, 1921-1923 ; Besairie, 1965 ; Jourde, 1972 ; Hottin, 1976 ; Roig et al., 2012). Chacun de ces auteurs a reconnu et décrit différents éléments structuraux et unités tectoniques du pays.

- Dans ce rapport, nous adoptons globalement les divisions utilisées par Roig et al. (2012), indiquées ci-dessous :



**Auteurs :** J-Y. Roig (BRGM) - R. D. Tucker (USGS) - S. G. Peters (USGS) - C. Delor (BRGM) - H. Théveniaut (BRGM).

**Réalisation cartographique et SIG :** C. Zammit (BRGM), J.P. Quinquis (BRGM), P. Vinauger (BRGM).  
**Avec la collaboration de :** V. Ralison (PGRM) - M. Rabarimanana (PGRM).  
**Superviseurs :** B. Moine, E. Ortega.

Figure 8 : Carte de Madagascar indiquant les principales unités géologiques (Roig et al., 2012)

Jusqu'à une date récente, la carte géologique la plus précise et la plus détaillée de Madagascar était celle de Besairie (1964). La carte de Besairie a été reprise par Du Puy & Moat (1996) :



# Madagascar

## Simplified Geology

David Du Puy & Justin Moat

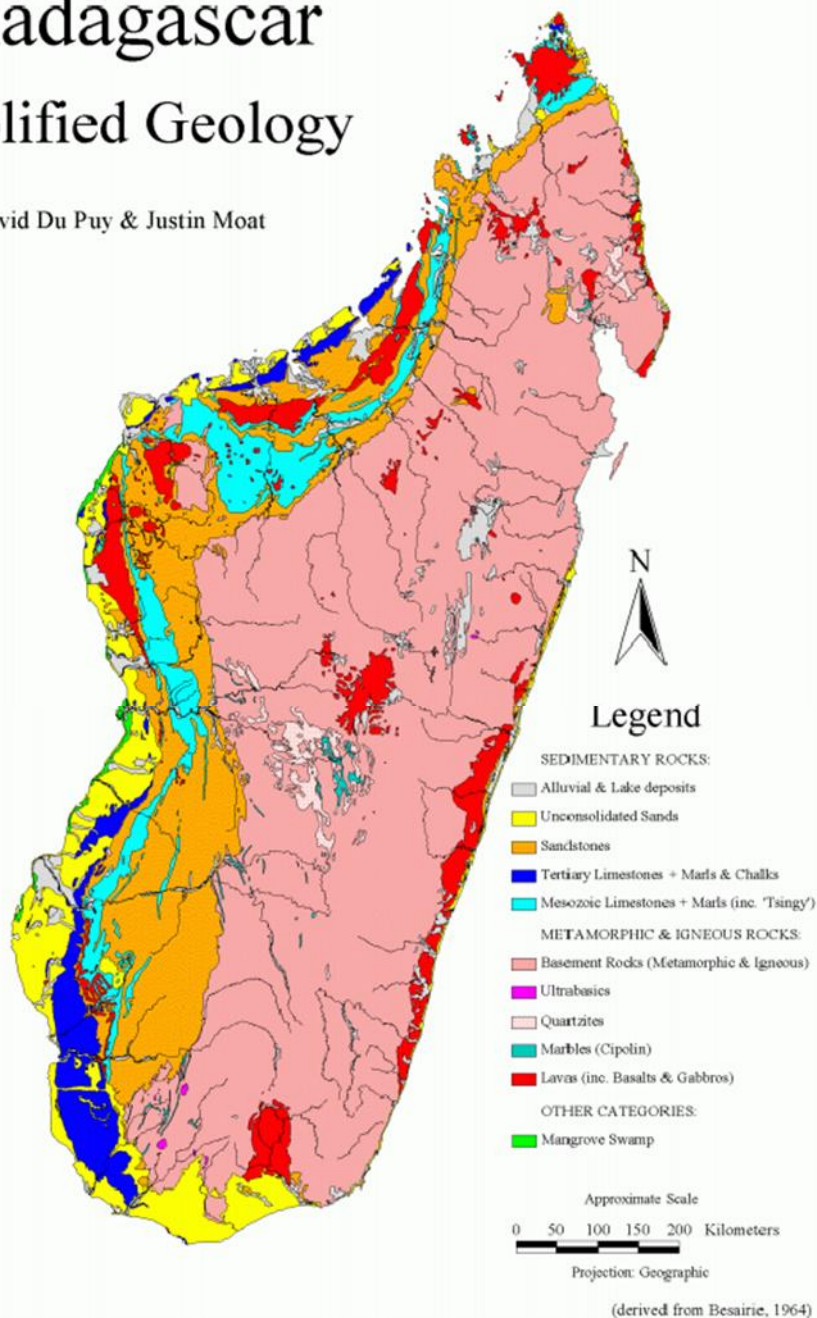


Figure 9 : Carte géologique simplifiée de Madagascar (Du Puy et Moat derived from Besairie, 1964)

Cette carte à l'échelle de 1:1 000 000 a été numérisée par Du Puy & Moat (1996) dans une publication sur la classification de la végétation primaire de l'île selon les caractéristiques géologiques. Afin de rendre leur étude plus accessible, Du Puy & Moat (1996) ont simplifié les 81 différentes catégories géologiques utilisées par Besairie (1964) en 10 groupes majeurs : grès, calcaires mésozoïques, calcaires tertiaires, sables non consolidés, dépôts alluviaux et lacustres, socle rocheux précambrien, ultrabasiques, quartzites, marbre et laves.

- Même si elle s'avère utile pour de nombreuses applications, leur carte ne reflète pas suffisamment la complexité géologique de Madagascar. En particulier, la complexe diversité géologique du Centre et de l'Est de Madagascar y est trop généralisée (Goodman et al., 2018).

Sur cet aperçu géologique, les géologues, par leur formation et la finalité des recherches qu'ils avaient entreprises, se sont intéressés avant tout à l'origine et la stratigraphie des roches constituant le sous-sol



malgache. Des études très complètes menées par d'éminents spécialistes dans le temps (H. Besairie, 1946) depuis plus de soixante-dix ans ont contribué à bien faire connaître l'histoire géologique de Madagascar et ont établi de façon précise la chronologie des systèmes métamorphiques précambriens avec le détail des principaux faciès des roches du socle ancien ainsi que la stratigraphie de la couverture sédimentaire.

La géologie influence le régime des fleuves et rivières malagasy surtout par le relief dont la configuration actuelle est déterminée par la nature des roches, liée aux mouvements tectoniques et à l'évolution morphologique par suite des phénomènes d'érosion. D'autre part, l'essentiel du débit des rivières provient du ruissellement de surface, complété par le drainage des couches d'altération. La proportion du débit provenant des nappes profondes est, sauf cas particuliers de plateaux calcaires très fissurés et de zones volcaniques perméables, généralement assez faible.

A partir des travaux de divers auteurs (H. Besairie, Ch. Robequain et R. Battistin) l'histoire géologique de Madagascar - en notant que le socle cristallin malgache qui couvre à peu près les deux tiers de l'île - est le résultat de la métamorphisation de formations sédimentaires primitives déposées dans une aire géosynclinale à la suite d'une orogénèse majeure datée de 2 600 millions d'années (H. Besairie, carte géologique de l'Atlas de Madagascar 1969). On a stratigraphiquement distingué quatre grands systèmes : les deux plus anciens sont le système Androyen et le système d'Antongil, puis le système du graphite et enfin le système du Vohibory.

Ces formations présentent une disposition stratifiée et plus ou moins violemment plissée à la suite de plusieurs reprises métamorphiques et tectoniques dont la plus récente semble dater de 500 millions d'années. Ces mouvements ont, d'une part, métamorphosé les sédiments précambriens, ont été accompagnés de migmatisations et de granitisations et ont entraîné d'autre part des cassures du socle provoquant des invasions marines et des dépôts de sédiments calcaires et sableux. Ces sédiments repris par des soulèvements régionaux ont été métamorphisés et ont donné la série schisto-quartzo-calcaire placée dans la stratigraphie entre les systèmes du graphite et du Vohibory. Ils sont localisés dans le centre de l'île et comprennent surtout des schistes, des quartzites et des cipolins. H. Besairie, dans l'ouvrage déjà cité, met à part l'ensemble des granites et migmatites des tampoketsa (affectés par une forte granitisation oblitérant les caractères originels). Ils constituent l'ossature des grands axes anticlinaux et peuvent renfermer des enclaves appartenant aux systèmes du graphite et du Vohibory, comme le montre la carte géologique de la figure 1.

En résumé, le vieux socle est constitué :

- D'abord par des terrains métamorphiques stratifiés (gneiss, leptinites, granites stratoïdes, etc.) sur lesquels reposent parfois en discordance des terrains où le métamorphisme est moins poussé et dans lesquels on reconnaît encore le faciès du sédiment originel (cipolins, calcaires, schistes, et quartzites, ces derniers dont l'épaisseur peut atteindre 300 m, étant les témoins de l'érosion des hautes chaînes cristallines) ;
- Puis par des intrusions d'âges divers (granites andringitréens entre autres), les plus récentes correspondant aux grandes dislocations du crétacé supérieur et au volcanisme de la fin du tertiaire début du quaternaire : venues acides (granites, microgranites, rhyolites) et basiques (gabbros, basaltes).

Les terrains sédimentaires forment une large bande sur la côte ouest de l'île mais on en rencontre aussi quelques lambeaux très peu étendus sur la côte est. Alors que les roches cristallines sont très plissées, les terrains sédimentaires, au contraire, n'ont subi aucune action orogénique notable et se sont déposés régulièrement (Besairie, 1946). Ils présentent actuellement un très faible pendage vers la mer. Cependant, à partir du crétacé et par suite de l'instabilité du socle qui a été soumis à des effondrements et soulèvements locaux avec failles et flexures de subsidence (Besairie, 1965), transgressions et régressions marines se succèdent avec formation de dépôts continentaux puis marins, en alternance avec de nombreux changements de faciès. C'est également de cette époque que datent les grands épanchements fissuraux surtout basaltiques qui s'étalent à la périphérie du socle, de Iharana à la baie d'Antongil, sur 450 km au sud de l'embouchure du Mangoro, massif de basalte et cryolites du pays Androy, nappes de basalte de l'ouest dans la région de Tuléar, au sud du Cap Saint-André et dans le bassin de Majunga.

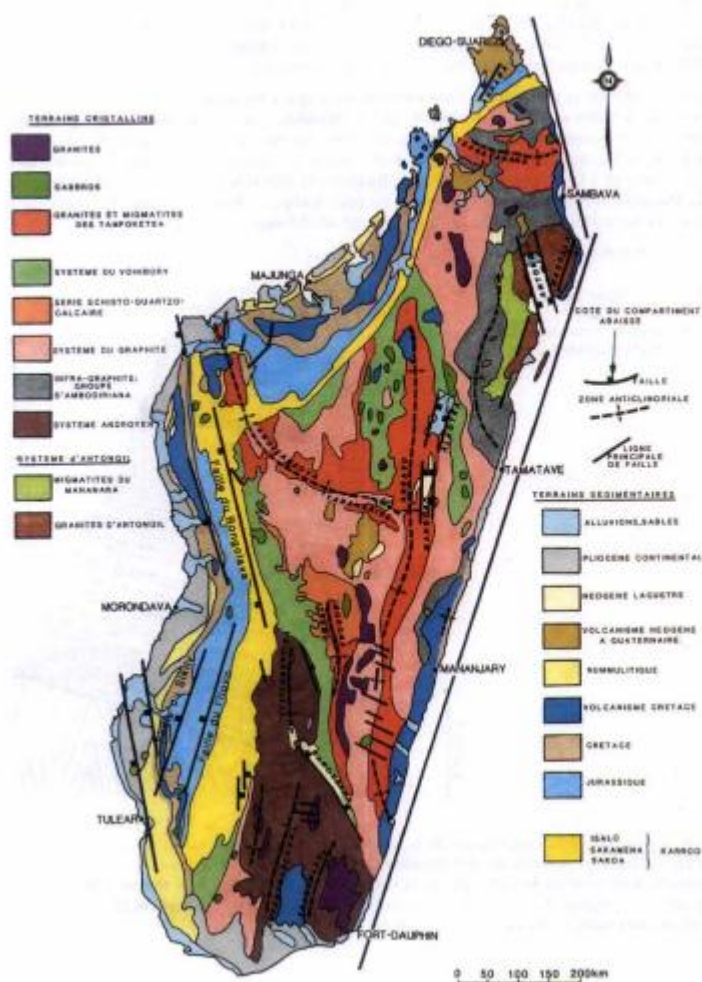


figure 1.2.  
Carte géologique  
et tectonique de  
Madagascar  
(d'après l'atlas  
de Madagascar  
par L. Brenon)

Figure 10 : Carte géologique de Madagascar (Source : P. Brenon, 1952 in Chaperon et al. (1993))

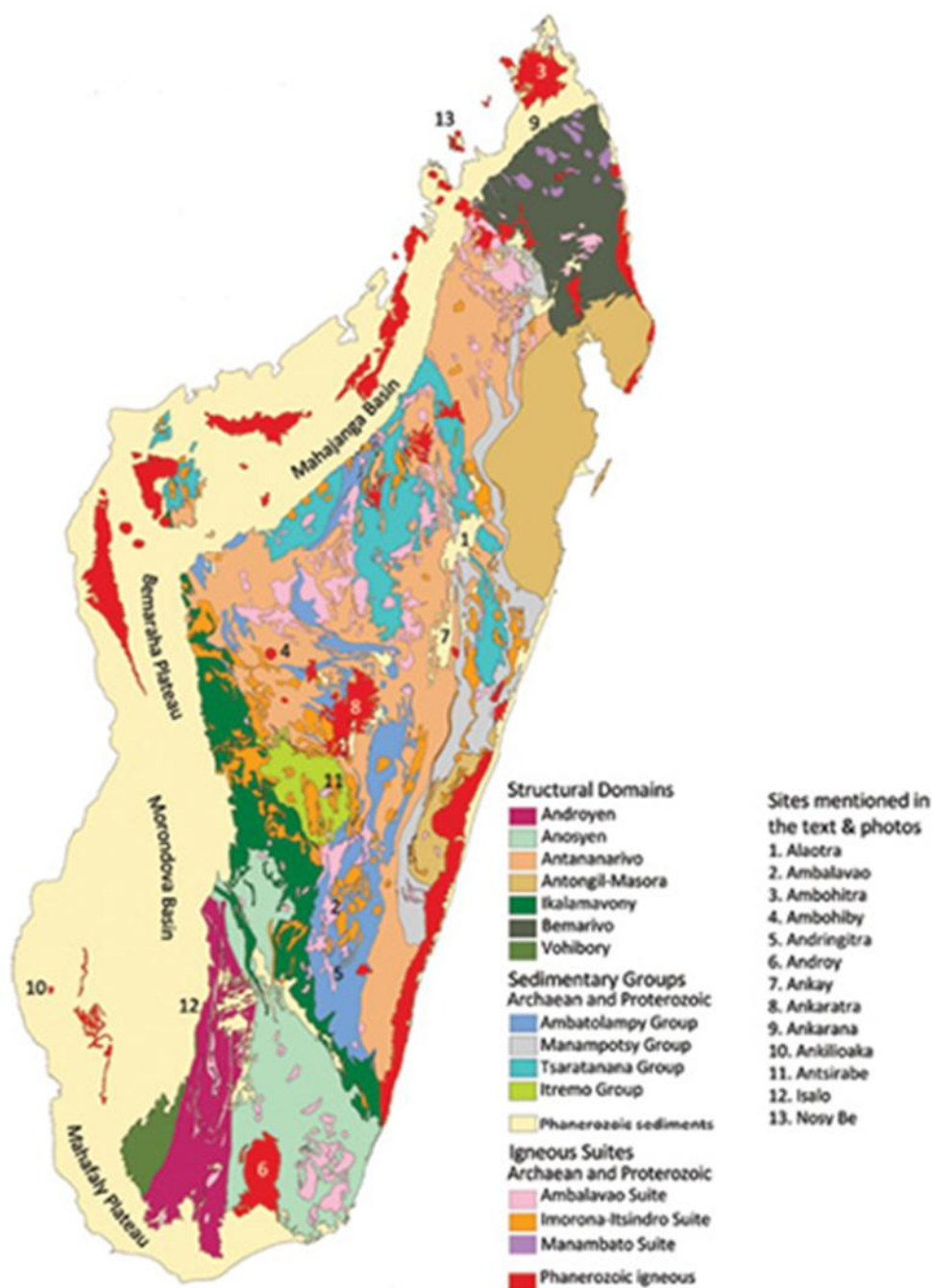


Figure 11 : Carte de Madagascar indiquant les principales unités géologiques (modifiée à partir de Roig et al., 2012) in Goodman et al. (2018)

### 8.1.3. Pédologie et types de sols de Madagascar

Dans les régions tropicales, comme Madagascar, les aspects édaphiques sont très complexes et présentent une dynamique particulière. Les sols sont dominés par des sols ayant connu des millions d'années d'évolution pédologique, même si on y trouve des sols moins développés.

A Madagascar, les perturbations naturelles les plus communes, qui conduisent à une relance de la pédogénèse, sont les glissements de terrain sur les pentes abruptes, les inondations et le dépôt de sédiments le long des principaux cours d'eau, en particulier dans les deltas et zones basses, associés aux cyclones, qui peuvent entraîner une érosion importante, surtout dans les régions côtières (Goodman et al., 2018). Sur le massif de l'Andringitra dans le Centre-sud, de nouveaux arguments confirment la théorie que les altitudes les plus élevées ont subi une glaciation pendant le Pléistocène et l'Holocène (Vidal Romani et al., 2002), même si l'impact est considéré comme très localisé et reste encore peu compris. Dans un milieu humide

et chaud, le rythme de la pédogénèse sera beaucoup plus rapide que dans un environnement froid et sec, car les processus biologiques et chimiques de la formation des sols dépendent fortement de la température. La nature de la roche-mère influence aussi la vitesse de développement des sols. Dans des conditions climatiques similaires, deux sols du même âge peuvent être assez différents en fonction de la vitesse d'altération de leur roche-mère respective.

A Madagascar, le climat varie d'un climat subtropical au Sud à tropical au Nord, avec une forte saisonnalité des précipitations, qui culminent entre novembre et avril. Les températures varient avec l'altitude : il fait plus chaud dans les plaines côtières et plus froid et plus tempéré sur les Hautes Terres centrales. La variation des précipitations est encore plus marquée que celle des températures, avec probablement un impact plus fort sur le développement du sol. Les régions du Nord et de l'Est reçoivent en moyenne plus de 2,5 m de pluie par an, certaines zones atteignant 7 m en moyenne. Les Hautes Terres centrales est plus sèches, avec des précipitations moyennes d'environ 1,5 m par an, tandis que certaines parties du Sud et du Sud-ouest particulièrement arides en reçoivent moins de 0,3 m. La forte pluviométrie et la lixiviation (processus de dissolution d'une substance à partir d'un solide, en faisant passer un liquide à travers ce solide) associée au cours du temps ont provoqué la formation de sols d'argile rouge acides et pauvres en nutriments qui dominent une grande partie du pays.

Ainsi, concernant la description régionale des sols, comme il a été constaté et observé, les couches pédologiques de Madagascar varient considérablement en termes de caractères physico-chimiques, de texture et d'âge, et en général les parties Est et Hautes Terres Centrales sont ferralitiques (ferralsols hapliques et Acrisols hapliques) et les parties Ouest et Sud et Sud-Ouest sont sédimentaires de nature diversifiée (calcaires, sables blancs, sables roux, alluvions, ferrugineux tropicaux, massifs karstiques, etc...).

Et toutes ces différentes parties régionales présentent également des fortes variations pédologiques locales et/ou stationnelles très marquées. Par conséquent, les sols sont assez variés d'une région à l'autre. Egalement, la plupart des zones hors et à proximité des Aires Protégées de Madagascar ont subi des perturbations anthropiques généralisées, telles que les feux de brousse, le défrichement ou l'agriculture itinérante sur brûlis, la déforestation à étendue importante occupée par la suite par des immenses formations végétales subligneuses secondaires et herbeuses au niveau régional et la perte de la couche arable associée ont altéré les méso-climats et modifié les conditions écologiques des zones naturelles originelles, rendant leurs lisières vulnérables (Harper et al., 2007).

En réalité, ces feux malavisés éliminent la végétation de vastes paysages, juste avant les mois de fortes pluies, et anéantissent la microflore et la microfaune du sol. Comme le notent Coq et al. (2007), les populations de micro-organismes dans les sols malgaches instaurent les transformations des molécules organiques dans les sols et régissent la dynamique de la matière organique du sol. Non seulement le feu supprime la matière organique du sol nécessaire à ces micro-organismes pour régénérer les nutriments à travers la décomposition, mais il tue les organismes eux-mêmes, finissant par rendre les sols incapables de faire pousser des cultures, des graminées, voire tout autre type de végétation.



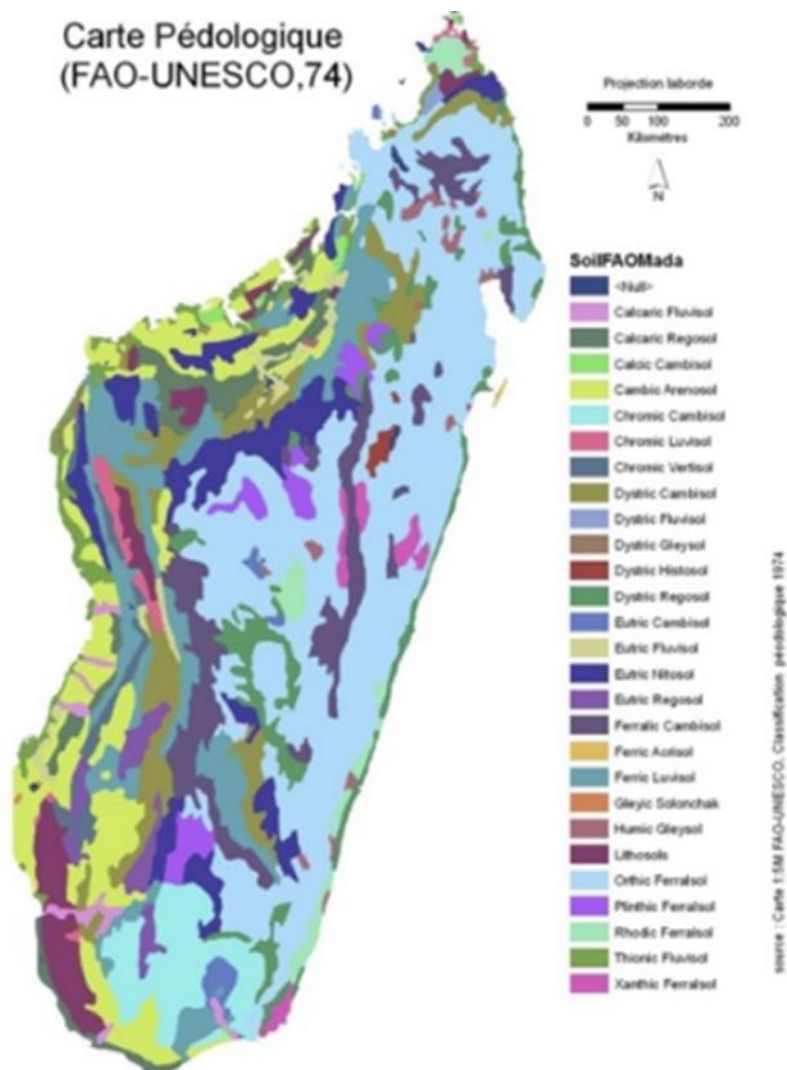


Figure 12 : Carte des sols de Madagascar (FAO and UNESCO, 1974)

#### 8.1.4. Topographie et géomorphologie

En plus de sa dissymétrie est-ouest et des contrastes topographiques entre Hautes Terres centrales et zones basses périphériques, Madagascar se révèle être avant tout un pays au relief très accidenté. L'île présente des reliefs complexes composés des Hautes Terres centrales, d'une côte orientale étroite et, à l'ouest, de grandes plaines déboisées et d'une côte dominée par le sable et les mangroves. Appelée "l'île rouge" (la couleur due à la latérite qui colore ses plateaux), elle se divise en quatre zones :

- Les Hautes Terres se concentrent dans le centre du pays.
- A l'Ouest, de vastes plaines près de longues plages de sable et de récifs coralliens.
- A l'Est, les Hautes Terres se transforment en escarpements abrupts et en collines qui accueillent des forêts tropicales qui débouchent sur une mince plaine côtière.
- Le Sud est semi-désertique et est parfois appelé « pays des formations végétales à épines ».



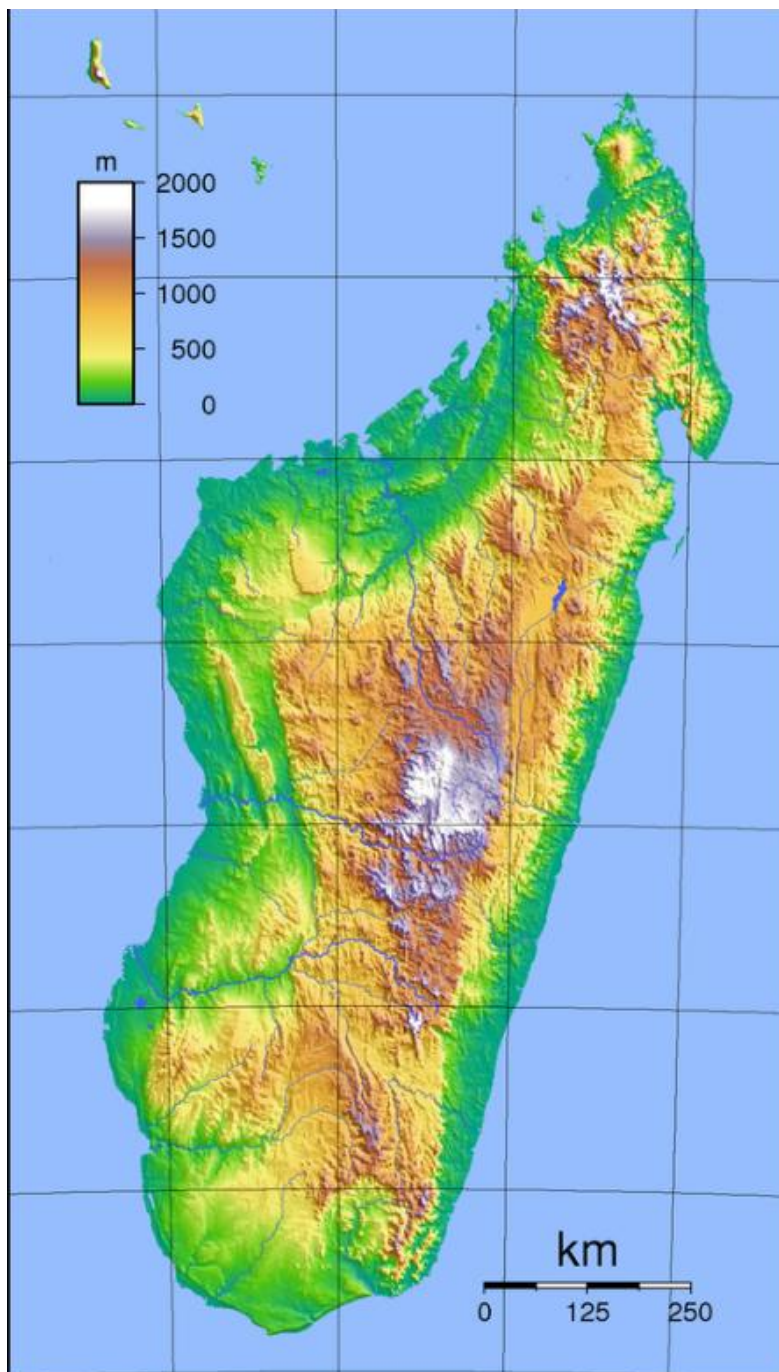


Figure 13 Carte topographique de Madagascar, Wikipedia, 2011

### 8.1.5. Hydrologie et hydrographie

Le réseau hydrographique composé de systèmes écologiques lenti-ques (Fleuves, Rivières et Ruisseaux) et lotiques (lacs, marais et marécages, lagunes, mangroves, etc...) divers est très inégalement réparti dans le Pays. La superficie totale des eaux continentales couvre environ 550.000 ha soit approximativement 1% de la surface de Madagascar. 197.000 ha de marais et rivières. Plus de 270.000 ha de mangroves.

Tableau 1 - Plans d'eaux des Pêches Continentales

PROVINCE	SUPERFICIE TOTALE DES EAUX (Ha)	ZONES PRODUCTIVES PRINCIPALES (Ha) <sup>1*</sup>	REMARQUE <sup>2*</sup>	POPULATION HUMAINE (1970) <sup>3*</sup>
TANANARIVE	35.000	9.500	25.000 Ha de marais et rivières peu productifs.	1.861.000.-
FIANARANTSOA	20.000	5.000	15.000 Ha de marais et rivières peu productifs.	1.863.000.-
TAMATAVE	190.000	33.000	157.000 Ha de marais et rivières peu productifs dont 75.000 Ha de marais au Lac Alaotra, en voie de comblement	1.220.000.-
MAJUNGA	215.000	77.000	Plus de 200.000 Ha de mangroves à haute potentialité piscicole partiellement exploitées.	918.000.-
TULEAR	75.000	18.000	60.000 Ha de mangroves à haute potentialité piscicole, faiblement exploitées.	1.168.000.-
DIEGO-SUAREZ	15.000	5.000	10.000 Ha de mangroves à haute potentialité piscicole peu exploitées.	617.000.-
MADAGASCAR	550.000	147.500	-	7.647.000.-

Madagascar dispose d'un large réseau hydrographique répartis sur cinq bassins versants. Le bassin Est accueille les fleuves Faraony, Mangoro, Manampatrana, Mananara, tandis que côté Ouest on trouve les fleuves Betsiboka Mangoky, Tsiribihina, Fiherena. Dans la partie Nord il y a les fleuves : Sambirano, Mahavavy, Loky, Besokatra, Irodo, Saharenana, Bemarivo, Lokoho.

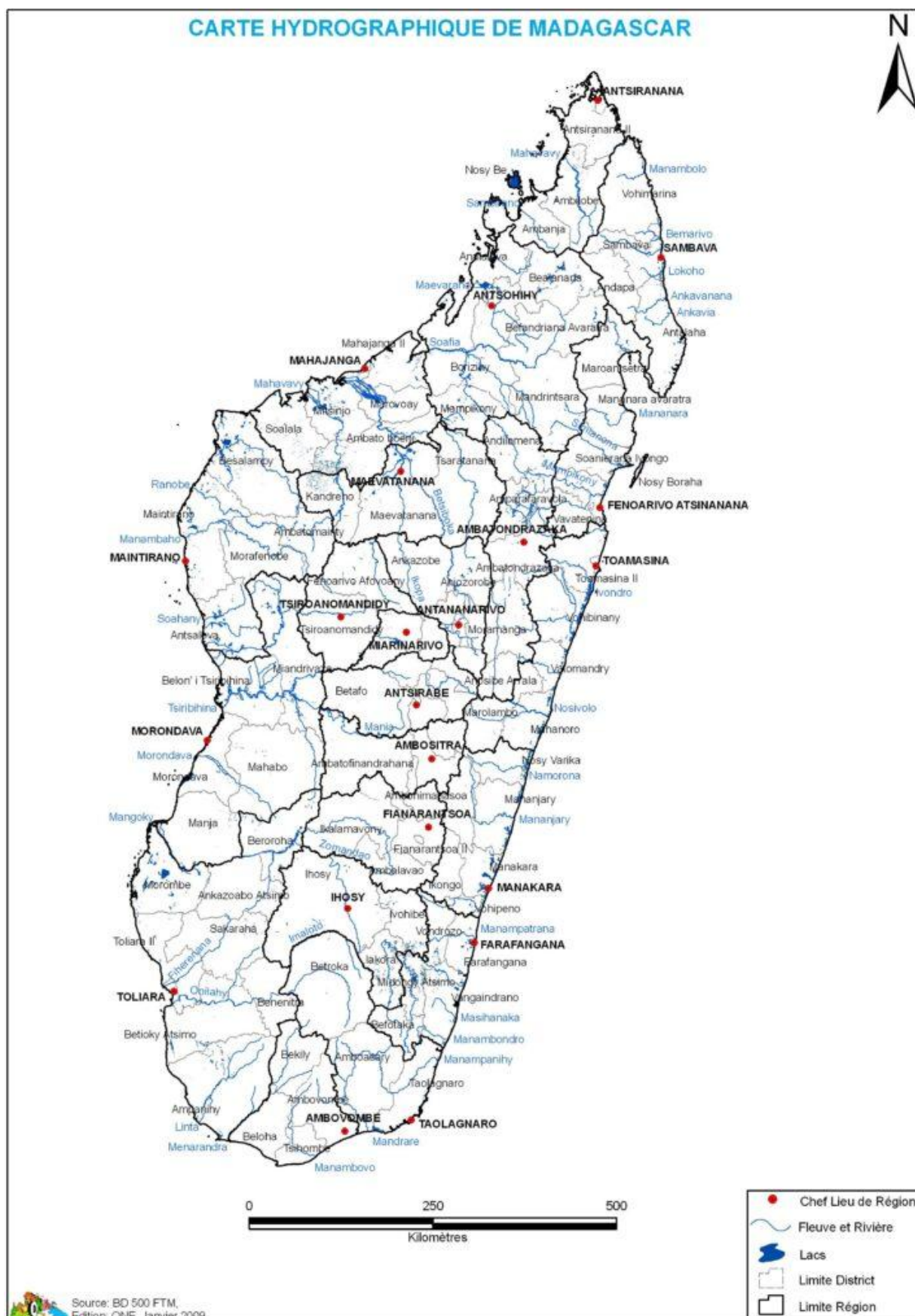


Figure 14 Carte hydrographique de Madagascar (BD500 FTM, 2009)

L'Alaotra (182 km<sup>2</sup>) est le plus vaste des grands lacs (Alaotra, Kinkony, Ihotry, Itasy, etc... ) de Madagascar. Et les cours d'eau de Madagascar sont répartis par différents bassins versants

Tableau 2 : Bassins versants de Madagascar et leurs cours d'eau

Grand bassin versant et sa superficie	Fleuve ou Rivière	Longueur	Superficie du bassin versant du cours d'eau
Les versants de la montagne d'Ambre : 11 200 km <sup>2</sup>	Besokatra	40 km	3 300 km <sup>2</sup>
	Irodo	80 km	4 300 km <sup>2</sup>
	Saharenana,	52 km	3 300 km <sup>2</sup>
Les versants du Tsaratanàna : 20 000 km <sup>2</sup>	Bemarivo	140 km	
	Maevarano,	203 km	
	Mahavavy	160 km	3 345 km <sup>2</sup>
	Sambirano	124 km	
Le versant Est : 150 000 km <sup>2</sup>	Faraony	150 km	2 761 km <sup>2</sup>
	Ivoloina		
	Ivondro	150 km	3 513 km <sup>2</sup>
	Manajary,	212 km	7 002 km <sup>2</sup>
	Mananara,	323 km	17 230 km <sup>2</sup>
	Mangoro	300 km	17 704 km <sup>2</sup>
	Maningory,	260 km	12 646 km <sup>2</sup>
	Namorona,	103 km	2 079 km <sup>2</sup>
	Rianila	134 km	7 594 km <sup>2</sup>
	Sandratsio	125 km	
Le versant Ouest : 365 000 km <sup>2</sup>	Betsiboka	605 km	48 879 km <sup>2</sup>
	Ikopa	485 km	
	Mahajamba	298 km	14 883 km <sup>2</sup>
	Mahavavy	160 km	3 270 km <sup>2</sup>
	Mahavavy sud	410 km	16 475 km <sup>2</sup>
	Tandra		
	Manambolo	370 km	13 970 km <sup>2</sup>
	Mangoky	714 km	55 884 km <sup>2</sup>
	Onilahy	400 km	32 225 km <sup>2</sup>
	Imaloto-Lalana	242 km	
	Sofia	328 km	28 295 km <sup>2</sup>
	Mangarahara		
	Anjobony	200 km	
	Bemarivo	265 km	
	Tsiribihina,	100 km	49 800 km <sup>2</sup>
	Sakeny	170 km	
	Mahajilo	Kitsamby	260 km
	Mania,	280 km	18 656 km <sup>2</sup>
Les versants Méridionaux : 48 750 km <sup>2</sup>	Linta	173 km	5 437 km <sup>2</sup>
	Manambovo	165 km	4 765 km <sup>2</sup>
	Menarandra	235 km	8 624 km <sup>2</sup>
	Mandrare	270 km	12 547 km <sup>2</sup>

Les cours d'eau (fleuves, rivières et ruisseaux), les lacs et leurs satellites, les marais et marécages, les mangroves, les lagunes et lagons, les récifs coralliens et les herbiers marins d'une part et d'autre part les nappes d'eau souterraine et les résurgences constituent des écosystèmes aquatiques potentiels pour les conditions de vie des êtres vivants et leur distribution géographique dans les milieux terrestres ou continentaux et ceux de littoraux et marins et côtiers. Leurs services écosystémiques assurent la pérennisation de la biodiversité, le refuge et l'adaptation de taxons sensibles face aux effets du changement climatique et le développement socio-économique à différente échelle (locale, régionale et nationale).





## A PROPOS DE COMBO+

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du programme COMBO+ (Conservation, atténuation et compensation de la biodiversité), une initiative qui vise à concilier les objectifs de développement économique et de conservation dans six pays d'Afrique et d'Asie : Guinée, Ouganda, Mozambique, Madagascar, RDP Lao et Myanmar.

Les partenaires du COMBO+ travaillent avec les gouvernements, le secteur privé, les institutions financières et la société civile pour définir et mettre en œuvre des politiques visant à atteindre une absence de perte nette, et de préférence un gain net, de biodiversité tout en contribuant à la réalisation des objectifs nationaux de biodiversité alignés sur le Cadre mondial pour la biodiversité (CMB) de Kunming-Montréal. Les domaines clés du programme de travail du COMBO+ consistent à aider les gouvernements hôtes à élaborer des politiques et à mettre en place les systèmes de gouvernance nécessaires pour soutenir une application rigoureuse de la hiérarchie des mesures d'atténuation (politique et pratique), à préparer et à rassembler des données et des orientations clés sur la biodiversité, à renforcer les capacités des fonctionnaires, des acteurs du secteur privé et de la société civile, notamment par l'échange d'expériences, et à étudier et à tester des mécanismes de mise en œuvre pour des mesures d'atténuation efficaces, y compris des compensations pour la biodiversité.

Le programme COMBO+, d'une durée de quatre ans (2021 - 2025), s'appuie sur une première phase de travail réussie, achevée en 2020. COMBO+ est mis en œuvre par la Wildlife Conservation Society (WCS) en partenariat avec Biotopie France, Biotopie Madagasikara, BIOFUND, Guinée Ecologie, le Myanmar Biodiversity Fund et l'Université du Queensland. Le programme est actuellement financé par l'Agence française de développement (AFD) et le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM), avec le cofinancement d'autres donateurs.

