

Small Hydro Resource Mapping in Madagascar

EXECUTIVE SUMMARY

[FRENCH VERSION]

March 2017



This report was prepared by [SHER Ingénieurs-Conseils s.a.](#) in association with [Mhylab](#), under contract to The World Bank.

It is one of several outputs from the small hydro resource mapping component of the activity “Renewable Energy Resource Mapping and Geospatial Planning – Madagascar” [Project ID: P145350]. This activity is funded and supported by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), a multi-donor trust fund administered by The World Bank, under a global initiative on Renewable Energy Resource Mapping. Further details on the initiative can be obtained from the [ESMAP website](#).

This document is a **final output** from the above-mentioned project and has been subject to **full peer review**. This document accompanies all the other outputs of the project and the Madagascar Small Hydro Atlas, which will be published via The World Bank’s main website and listed on the ESMAP website - please refer to the corresponding country page.

Copyright © 2017 THE WORLD BANK
Washington DC 20433
Telephone: +1-202-473-1000
Internet: www.worldbank.org

The World Bank, comprising the International Bank for Reconstruction and Development (IBRD) and the International Development Association (IDA), is the commissioning agent and copyright holder for this publication. However, this work is a product of the consultants listed, and not of World Bank staff. The findings, interpretations, and conclusions expressed in this work do not necessarily reflect the views of The World Bank, its Board of Executive Directors, or the governments they represent.

The World Bank does not guarantee the accuracy of the data included in this work and accept no responsibility for any consequence of their use. The boundaries, colors, denominations, and other information shown on any map in this work do not imply any judgment on the part of The World Bank concerning the legal status of any territory or the endorsement or acceptance of such boundaries.

The material in this work is subject to copyright. Because The World Bank encourages dissemination of its knowledge, this work may be reproduced, in whole or in part, for non-commercial purposes as long as full attribution to this work is given. Any queries on rights and licenses, including subsidiary rights, should be addressed to World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, USA; fax: +1-202-522-2625; e-mail: pubrights@worldbank.org. Furthermore, the ESMAP Program Manager would appreciate receiving a copy of the publication that uses this publication for its source sent in care of the address above, or to esmap@worldbank.org.

Phase 3 - Production of a Validated Resource Atlas

EXECUTIVE SUMMARY

Renewable Energy Resource Mapping: Small Hydro – Madagascar [P145350]

April 2017



Version Française



IN ASSOCIATION WITH



FINAL OUTPUT

Remerciements

Ce rapport a été préparé par un consortium comprenant SHER Ingénieurs-Conseils, Mhylab et Artelia Madagascar. L'équipe était dirigée par Gérard Chassard et Pierre Smits avec les appuis de Quentin Goor, Gérard Malengé, Serge Lala Rakotoson, Thomas Dubois, Faly Rabemanantsoa, Vincent Denis, Alice Vandenbussche, Jean René Ratsimbazafy, Sandy Ralambomanana, Flore Rabenjarison Bernard Rakotoaribeby et Damien Dubois.

Le travail et le rapport ont été appuyés par l'équipe de la Banque Mondiale menée par Vonjy Rakotondramanana et Rikard Liden et par l'équipe du Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures et des organismes rattachés.

Les résultats présentés dans ce rapport sont basés sur des données et informations exhaustives provenant d'un large nombre d'acteurs, que nous remercions pour leurs précieuses connaissances et contributions. Les contributeurs principaux ont été le Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures, l'ORE, la JIRAMA, l'ADER and la Direction Générale de la Météorologie.

Ce projet a pu être possible grâce à l'appui du programme Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) administré par la Banque Mondiale (Mr Oliver Knight) et appuyé par 11 donateurs bilatéraux.



Correspondence Table between the terms of reference and reporting and the ESMAP phases:

ESMAP General Phasing	Correspondence with ESMAP-Small Hydro Madagascar ToR
Phase 1 Preliminary resource mapping output based on satellite and site visits	Activity 1 - Data collection and production of Hydro Atlas, review and validation of small hydro potential Activity 2 - Small hydro electrification planning Activity 3 - Small hydro prioritization and workshop
Phase 2 Ground-based data collection	Activity 4 - Data collection and final validation (from the REVISED TERMS OF REFERENCES FOR THE ACTIVITY 4) : A - Review of previously studied small hydropower sites B - Data collection and final validation C - Pre-feasibility study of two priority sites for small hydropower development
Phase 3 Production of a validated resource atlas that combines satellite and ground-based data	D - Support to the Ministry of Energy to build capacity and take ownership of the created GIS database for hydropower E - Updated Small Hydro Mapping Report for Madagascar

SHER Ingénieurs-conseils s.a.

Rue J. Matagne, 15
5020 Namur – Belgium
Phone : +32 81 32 79 80
Fax : +32 81 32 79 89
www.sher.be

Project Manager: Rebecca DOTET
Référence SHER : MAD04
Phone : +32 (0) 81 327 982
Fax : +32 (0) 81 327 989
E-mail : dotet@sher.be

Rev.n°	Date	Content	Drafted	Verified
0	03/2015	Executive Summary - FINAL	Pierre SMITS	Julien LEFEVERE
1	04/2017	Executive Summary – FINAL update Phase 3	Quentin GOOR	Pierre SMITS

SHER INGÉNIEURS-CONSEILS S.A.
IS ISO 9001 CERTIFIED



Abréviations et acronymes

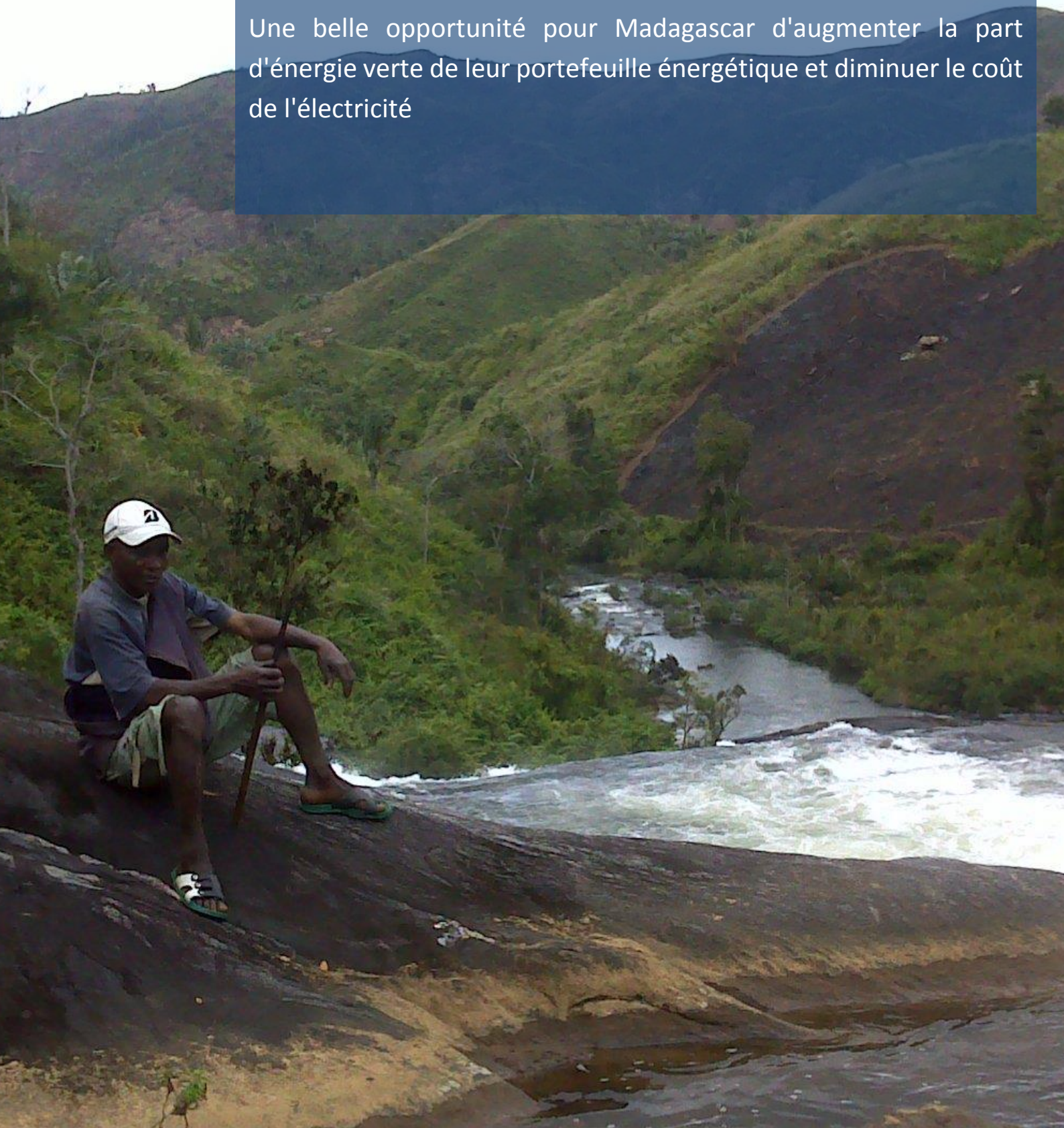
ADER	Agence de Développement de l'Électrification Rurale
APD	Avant-Projet Détaillé
APS	Avant-Projet Sommaire
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program
FTM	FOIBEN-TAOSARINTANIN'I MADAGASIKARA
GWh	Giga Watt heure, Milliards de kWh ou Millions de MW
JIRAMA	Jiro sy Rano Malagasy (Société d'électricité et d'eau de Madagascar)
kW	kilo Watt
kWh	kilo Watt heure
LCOE	Levelized Cost Of Electricity
MW	Mega Watt
MWh	Mega Watt heure
ORE	Office de Régulation de l'Électricité
PIC	Projet Pôles Intégrés de Croissance
SIG	Système d'Information Géographique

Table des matières

1. Introduction	9
1.1 Contexte général du projet ESMAP - FWC.....	10
1.2 Objectifs, résultats et activités de l'étude	10
2. Développement de la petite hydraulique : une opportunité pour Madagascar	13
2.1 Secteur électrique et mix énergétique actuel.....	13
2.2 Forces et faiblesses du développement de la petite hydraulique à Madagascar	14
2.3 Rôle de la petite hydro.....	18
3. Potentiel de la petite hydroélectricité à Madagascar.....	20
3.1 Sites identifiés à partir des informations existantes	20
3.2 Nouveau sites - Contribution de SiteFinder : outil de détection de sites hydroélectriques	21
3.3 Intégration des sites préalablement identifiés et des nouveaux sites dans une base de données unique	22
3.4 Production de la base de données finale	22
3.5 Potentiel de la petite hydroélectricité consolidé	22
4. Priorisation des petits sites hydroélectriques prometteurs	25
4.1 Processus d'identification et sélection des sites prometteurs	25
4.2 Résultats de la sélection et portefeuille de projets hydro-électriques 1-20 MW	26
4.3 Meilleurs sites prometteurs pour un investissement à court terme	27
5. Sites à développer dans le court terme	30
6. Le SIG un outil pour un développement du potentiel hydroélectrique.....	41

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Une belle opportunité pour Madagascar d'augmenter la part d'énergie verte de leur portefeuille énergétique et diminuer le coût de l'électricité



Introduction

Introduction

1.1 CONTEXTE GÉNÉRAL DU PROJET ESMAP - FWC

ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) est un programme d'assistance technique administré par la Banque Mondiale et soutenu par 11 donateurs bilatéraux. ESMAP a lancé, en janvier 2013, une initiative qui permet de soutenir les efforts menés par les pays pour améliorer la connaissance des ressources en énergie renouvelable (ENR), mettre en place des cadres institutionnels appropriés pour le développement des ENR, et fournir un « libre accès » aux ressources et données géospatiales. Cette initiative appuiera également le programme IRENA-GlobalAtlas en améliorant la disponibilité des données et la qualité consultable à travers un Atlas interactif.

Cette étude "Renewable Energy Resource Mapping: Small Hydro Madagascar", fait partie d'un projet d'assistance technique, financé par ESMAP, mis en œuvre par la Banque Mondiale à Madagascar (le « Client »), qui vise à soutenir les ressources cartographiques et la planification géospatiale pour la petite hydraulique. Il est mené en étroite coordination avec le Ministère de l'Energie, l'Office de Régulation de l'Electricité (ORE), Agence de Développement de l'Electrification Rurale (ADER) et la JIRAMA.

1.2 OBJECTIFS, RÉSULTATS ET ACTIVITÉS DE L'ÉTUDE

Les objectifs de l'étude sont :

- L'amélioration de la qualité et de la disponibilité de l'information sur la ressource hydro-électrique de Madagascar;
- Une revue détaillée et mise à jour du potentiel de petite hydroélectricité (1-20 MW), et
- Des recommandations concernant l'implémentation de la petite hydroélectricité dans le cadre de la planification du secteur énergie.

Les résultats attendus de l'étude sont :

- Des données rassemblées dans une base de données géographique (SIG);
- Un atlas thématique sur l'hydroélectricité à Madagascar avec une emphase particulière sur la petite hydroélectricité, et
- Des recommandations pour développer le secteur de la petite hydroélectricité à Madagascar.

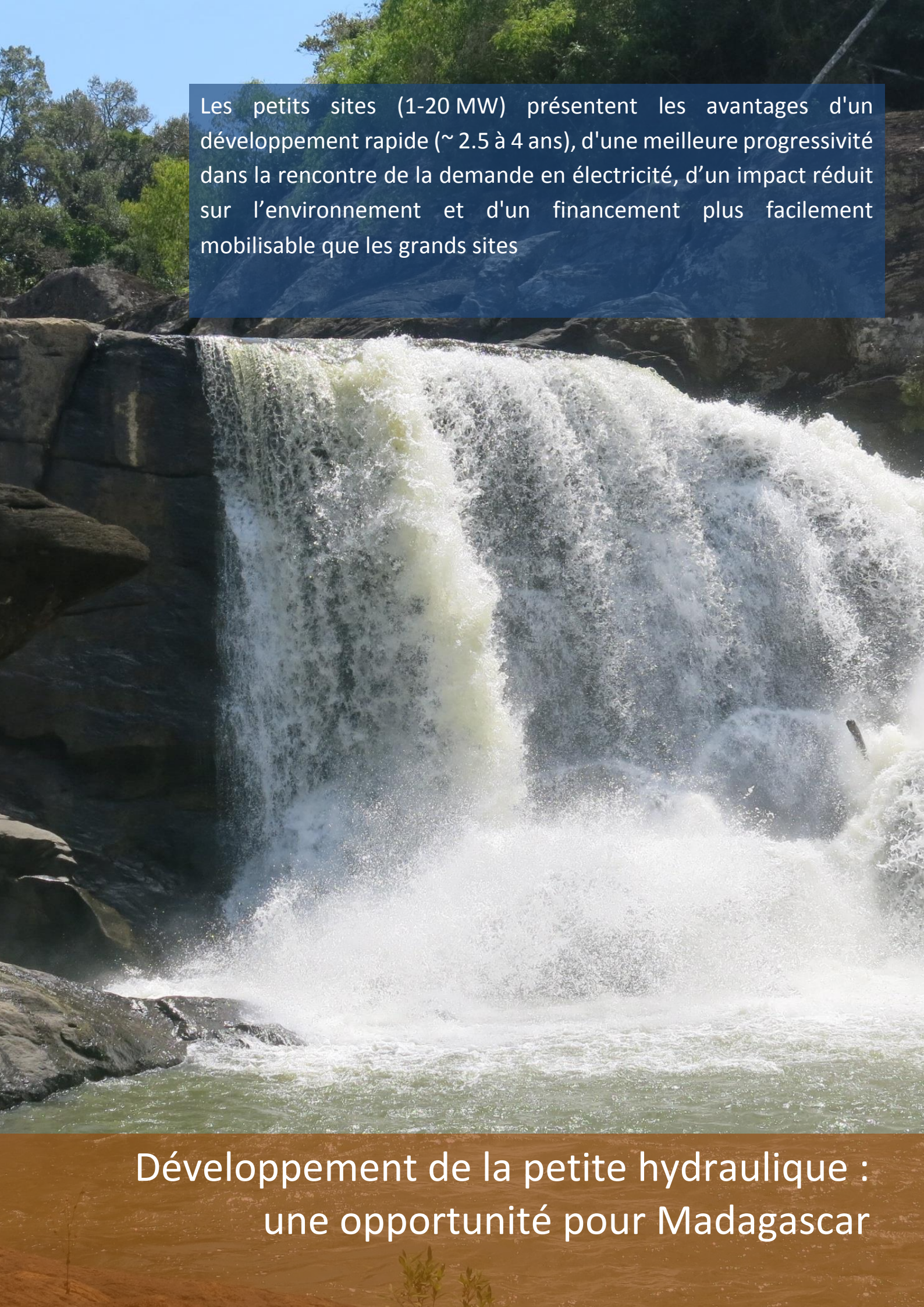
Les 3 phases de l'étude ESMAP sont :

- **PHASE 1** : Cartographie préliminaire de la ressource basée sur une analyse géographique et des visites de sites

- **PHASE 2** : Campagne de collecte des informations de terrain
- **PHASE 3** : Production d'un Atlas validé des ressources combinant des données cartographiques et des mesures de terrain

Pour Madagascar, ces trois phases ont été ventilées dans 4 activités :

- **Activité 1** : Récolte de données et production d'un HydroAtlas / Revue et validation du potentiel de la petite hydroélectricité
- **Activité 2** : Intégration du développement de la petite hydroélectricité dans la planification de l'électrification (rurale et interconnectée) à Madagascar
- **Activité 3** : Priorisation de la petite hydroélectricité, visite des sites et atelier de validation
- **Activité 4** : Récolte de données de terrain et validation finale (update de l'HydroAtlas / campagne de mesures hydrologiques / études complémentaire en géologie et environnement)



Les petits sites (1-20 MW) présentent les avantages d'un développement rapide (~ 2.5 à 4 ans), d'une meilleure progressivité dans la rencontre de la demande en électricité, d'un impact réduit sur l'environnement et d'un financement plus facilement mobilisable que les grands sites

Développement de la petite hydraulique :
une opportunité pour Madagascar

2. Développement de la petite hydraulique : une opportunité pour Madagascar

2.1 SECTEUR ÉLECTRIQUE ET MIX ÉNERGÉTIQUE ACTUEL

Madagascar dispose d'énormes ressources d'énergie essentiellement renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne, biomasse), mais la consommation énergétique globale reste encore très faible. Cette consommation énergétique est encore dominée par le bois énergie et ses dérivés. Par ailleurs, le pays est importateur de produits pétroliers et le coût de l'énergie est trop élevé pour contribuer efficacement au développement social et économique du pays.

Aujourd'hui, très peu de personnes à Madagascar ont accès à des sources d'énergie modernes, et cela freine sérieusement le développement. En outre, les personnes qui n'y ont pas accès doivent utiliser des sources d'énergie de moins bonne qualité, inefficaces, et souvent polluantes, pour lesquelles ils dépensent beaucoup plus que les privilégiés qui y ont accès. Les ménages qui ne sont pas raccordés au réseau électrique dépensent en moyenne entre 2 et 10 fois plus pour des niveaux d'éclairage nettement inférieurs que ceux qui sont raccordés.

Pour l'Électricité, les infrastructures sont insuffisantes et une grande partie des installations de production et de distribution existantes sont vétustes et ne pourraient plus satisfaire la demande croissante actuelle. Certaines installations de production sont saturées et sont très vulnérables aux intempéries malgré la richesse en ressources d'énergies renouvelables peu exploitées du pays. Cette situation constitue un handicap au développement du pays et un frein à la compétitivité des industries exportatrices. Dans le domaine agricole, la demande en énergie électrique (station de pompage électrique) reste encore négligeable.

Les objectifs du secteur de l'énergie du Gouvernement de Madagascar sont de poursuivre le programme global de réforme économique engagé visant à atteindre une croissance économique accélérée sous le dynamisme et l'initiative des investissements privés. L'insuffisance des infrastructures économiques de base nuit à l'amélioration des performances en matière de croissance économique et de réduction de la pauvreté. Pour pallier à cette insuffisance, particulièrement dans le domaine de l'énergie, les actions du gouvernement doivent accélérer l'accroissement de l'accès de la population à l'énergie par une politique centrée sur la participation des communautés bénéficiaires et du secteur privé et axée sur le développement des sources d'énergies renouvelables. Ceci devrait se traduire par une réduction des coûts et une augmentation de la productivité.

Du fait des enjeux et des objectifs pour le secteur énergie à Madagascar et aussi de l'intégration dans la lutte pour la protection de l'environnement au niveau mondial, il faut réussir impérativement à concilier la poursuite d'une politique énergétique soutenue et la réduction de ses impacts négatifs sur l'environnement et la santé. L'effort est, en fait, de promouvoir des solutions profitables à tous actuellement et pour nos générations futures.

Ces efforts consistent entre autres à :

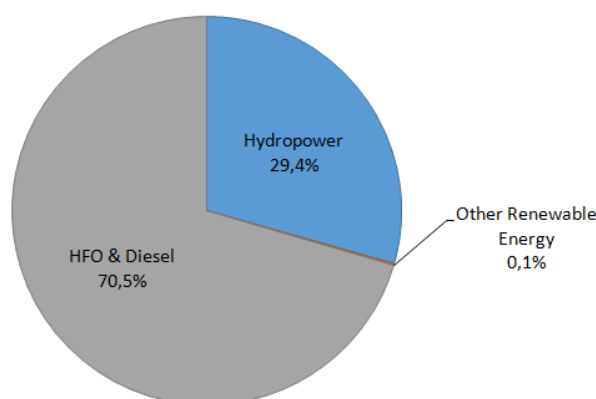
- promouvoir l'usage moderne de l'énergie avec des équipements efficaces sur le plan énergétique,
- favoriser l'utilisation d'énergies renouvelables pour remplacer progressivement les énergies traditionnelles.

Il faut aussi souligner que le bois est la principale source d'énergie utilisée par une grande partie des ménages malgaches pour leurs besoins quotidiens (éclairage, cuisson, ...) ce qui favorise la déforestation nuisible à l'environnement.

Il est nécessaire d'accélérer la substitution de l'énergie bois et l'accès à l'électricité par la production thermique par d'autres sources telles que le gaz butane, la biomasse (biocombustible et biocarburant), le solaire, l'éolienne et l'hydroélectricité.

Avec la libération du secteur de l'électricité en 1999, le gouvernement a engagé un grand nombre de réformes structurelles, avec les créations de l'ORE, de l'ADER et du FNE et des programmes de développement comme le projet PIC (Pôles Intégrés de Croissance), qui méritent certaines améliorations pour privilégier les investissements privés ou en partenariat public-privé.

Madagascar possède une capacité installée de production d'électricité de 552 MW dont 162 MW et 389 MW produits respectivement par l'hydroélectricité et le thermique. Le reste étant produit par d'autres sources d'énergie renouvelable telles que l'éolien, le solaire et la biomasse. De cette capacité installée de 552 MW, seuls 303 MW sont actuellement disponibles (juin 2014), soit 54.9%.



En juin 2014, la puissance installée de source hydroélectrique était répartie entre 11 centrales hydroélectriques majeures dont la puissance installée varie entre 0.45 MW, à Manandray dans la province de Fianarantsoa, à 91 MW, à Andekaleka dans la province de Toamasina.

2.2 FORCES ET FAIBLESSES DU DÉVELOPPEMENT DE LA PETITE HYDRAULIQUE À MADAGASCAR

Trois modes de raccordement sont présents à Madagascar :

- Réseaux interconnectés opérés par la JIRAMA. Il y a 3 réseaux interconnectés à Madagascar (RIA, RIF, RIT)

- Réseaux ou centres isolés (JIRAMA/Privé)
- Petit réseau isolé alimenté par une seule source de production

Les tableaux suivants présentent les forces et faiblesses des 3 types de réseau au regard du développement de projets de petite hydro (1-20 MW) à Madagascar.

RÉSEAUX INTERCONNECTÉS (RI) opéré par la JIRAMA	
Forces de la petite hydraulique (1-20MW)	Faiblesses de la petite hydraulique (1-20MW)
Opportunité pour les projets peu éloignés du réseau HT existant (RI) : Evacuation aisée de l'énergie produite, permettant de renforcer le RI. Impact positif sur les émissions de GES du pays: Participation à la réduction des émissions de GES permettant d'atteindre les objectifs fixés à long terme. Potentiellement éligibles pour crédits CDM : Amélioration de la rentabilité de ces projets s'ils ont accès aux crédits CDM de la Banque Mondiale. Coûts d'investissement et de financement réduits : Et conditions d'accès au financement de ces infrastructures de plus petite taille sont plus aisées. Durée du cycle développement des projets plus courts : Des projets jusque 20MW peuvent renforcer la production sur le RI à plus court terme. Cout de production compétitif par rapport au thermique : Opportunité de substitution d'une partie de la production d'énergie d'origine thermique à moindre coût (Petite hydro : ~ 40 US\$/MWh - 200 US\$/MWh). Vers une indépendance énergétique et la maîtrise des coûts variables de production : Substitution d'une partie de la production d'énergie d'origine thermique par de la petite hydraulique permet de réduire les importations Impacts environnementaux et sociaux réduits en comparaison des projets de grande hydraulique. Flexibilité dans les opérations de maintenance : Les impacts des opérations de maintenance de petites centrales ont un impact réduit sur la production en comparaison des grands projets hydroélectriques.	La grande hydraulique est généralement préférée dans les plans directeurs nationaux : Les projets de grande hydro sont régulièrement privilégiés dans les schémas directeurs nationaux par rapport aux projets de taille inférieure. Au niveau de Madagascar, des projets de 10-20 MW sont cependant significatif vis-à-vis du parc installé. Saturation potentielle du réseau : Difficulté de renforcer le réseau HT s'il est saturé. Puissance de base : les projets de petite hydraulique ne possèdent généralement que de peu de capacité de stockage (réservoir) permettant une production de pointe.
Recommandations	
Favoriser le développement à court-terme des projets d'une puissance jusque 20MW les plus proches du réseau et des accès existants qui ont des coûts de production faibles et des risques hydrologique et socio-environnementaux maîtrisables liés à leur développement. Réalisation d'un schéma directeur sur l'ensemble des trois réseaux interconnectés (RIA, RIF, RIT) devrait pouvoir analyser et comparer différents scénarios de planification en tenant en compte de la pertinence économique de l'introduction progressive de plus de petite hydro versus un grand projet et des opportunités économiques d'interconnexion des 3 réseaux.	

RÉSEAUX OU CENTRES ISOLÉS (JIRAMA/Privé)	
Forces de la petite hydraulique (1-20MW)	Faiblesses de la petite hydraulique (1-20MW)
Adéquation de l'offre et de la demande : La taille des projets de petite hydraulique est généralement mieux adaptée à la demande locale. Fourniture d'énergie aux centre isolés qui ne bénéficieraient pas du développement de l'énergie produite par les grands projets hydroélectriques car les lignes de transmissions et de distribution ne seraient pas développées jusqu'à ces réseaux et centres isolés. Mais pourront être prolongés, voire raccordés entre eux dans le futur. Possibilité d'obtenir des aides financières (dons, subventions taux bas).	Planification complexe : Complexité de planifier l'ensemble des réseaux isolés à moyen terme sans une bonne vision de long terme sur les choix des moyens de production compte tenu du nombre important de sites et de possibilités de développement. Gestion complexe du réseau dans le cas d'une pénétration trop forte d'énergie renouvelable intermittente : la petite hydraulique seule, sans réservoir de régulation, ne permet pas de gérer de manière adéquate la production intermittente des ENR telles que le solaire et l'éolien.
Recommandations	
Mettre en place une planification des investissements productifs qui tienne compte des différentes sources possibles de production (Eolien, solaire, biomasse, thermique) Rechercher des projets de petite hydro proches des centres isolés et à coût compétitif par rapport aux groupes thermiques. Permettre, lorsque c'est possible, le phasage du développement des projets de petite hydraulique en fonction de la demande Investissement dans le développement et la réhabilitation des routes et pistes en milieu rural permettrait de diminuer les coûts d'investissement pour le développement de projets de petite hydraulique et d'ainsi renforcer leur compétitivité par rapport à la grande hydraulique.	

PETIT RÉSEAU ISOLÉ (alimenté par une seule source de production)	
Forces de la petite hydraulique (1-20MW)	Faiblesses de la petite hydraulique (1-20MW)
Possibilité de réduction des coûts de développement : Simplification possible de la conception pour réduire au maximum les coûts de production. Adéquation de l'offre et de la demande : Taille des projets de petite hydraulique généralement mieux adaptée à la demande locale. Fourniture d'énergie aux centre isolés qui ne bénéficieraient pas du développement de l'énergie produite par les grands projets hydroélectriques car les lignes de transmissions et de distribution ne seraient pas développées jusqu'à ces réseaux et centres isolés. Possibilité d'obtenir des aides financières (dons, subventions taux bas) compte tenu du caractère capitalistique des projets hydroélectriques.	Inadaptation aux régions caractérisées par des périodes d'étiages importantes : difficulté de justifier des projets de mini hydro lorsque les étiages sont sévères, ce qui est le cas particulièrement dans les régions bénéficiant d'une pluviométrie moins importante et/ou mal répartie (Sud et Ouest de Madagascar). Planification difficile à généraliser sur tout le pays.
Recommandations	
Privilégier le développement des projets dans les zones qui bénéficient d'une pluviométrie bien répartie sur l'année. Intégration aux projets de développements futurs : Lorsque c'est possible, considérer dans le développement des projets que les infrastructures permettent un raccordement futur au réseau afin que ces projets ne soient pas abandonnés après raccordement. Investissement dans le développement et la réhabilitation des routes et pistes en milieu rural permettrait de diminuer les coûts d'investissement pour le développement de projets de petite hydraulique et d'ainsi renforcer leur compétitivité par rapport à la grande hydraulique.	

2.3 RÔLE DE LA PETITE HYDRO

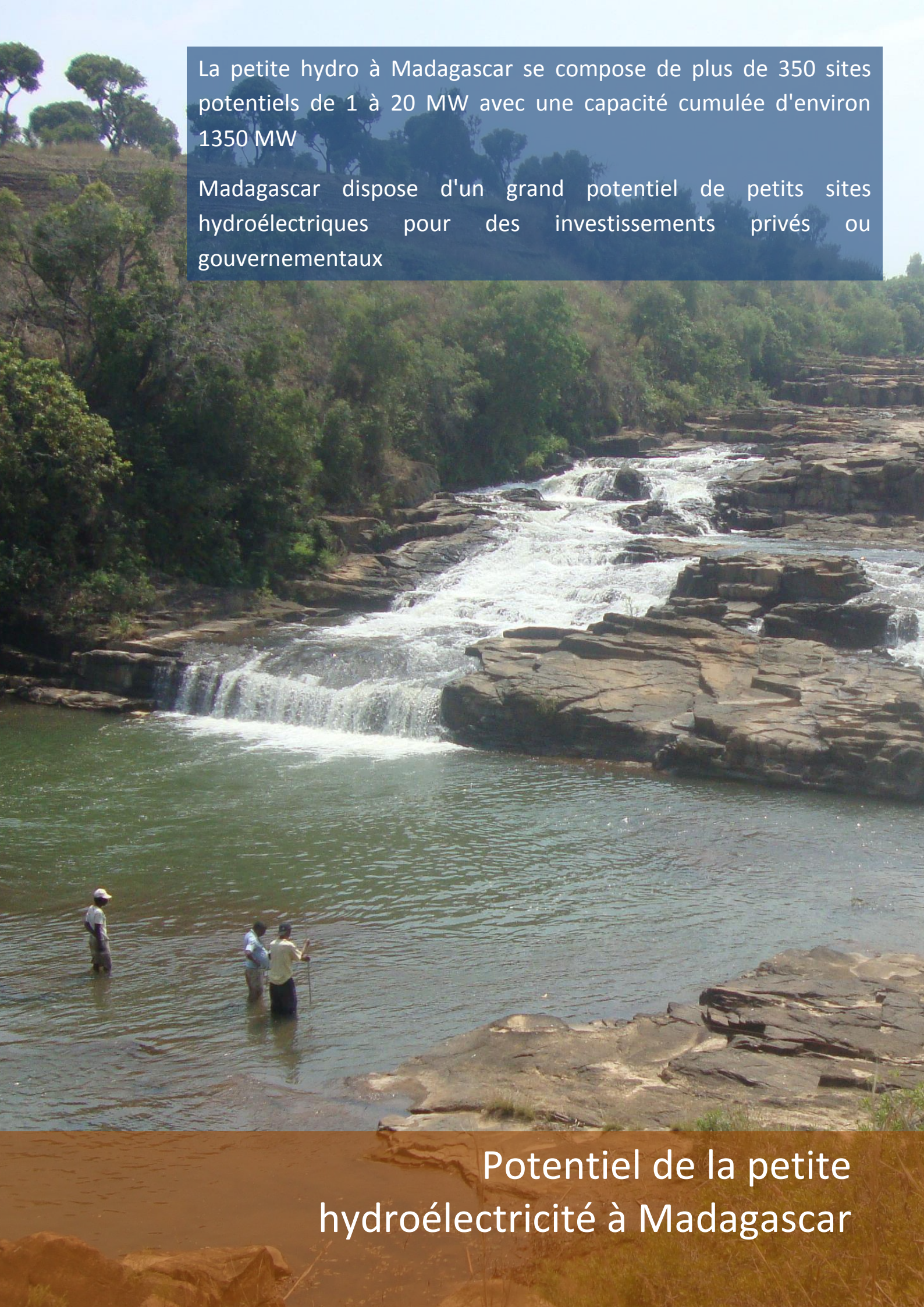
Le potentiel hydroélectrique de Madagascar en petite hydro est important et encore largement sous-exploité. Des opportunités existent dans toutes les gammes de puissance. Le développement de ce potentiel est cependant freiné par la taille du pays, l'obsolescence du réseau de pistes et routes et la dispersion des zones urbaines. La dégradation des sols - érosion, orpaillage et exploitation minière artisanale, lavaka - dans certaines régions (particulièrement au Sud, Centre-Ouest et Ouest) est inquiétante et peut remettre en cause la viabilité voire même la faisabilité de certains projets hydrauliques. Ce contexte de dégradation des bassins versants ainsi que la gestion des sédiments est à prendre en compte dans tous les futurs projets hydroélectriques, qu'ils soient grands ou petits. De manière générale, tout nouveau développement doit faire partie d'une gestion intégrée des bassins versants. Ceci afin de préserver pour longtemps le patrimoine hydraulique de Madagascar.

Les petits sites présentent l'avantage d'un développement plus rapide (~ 2.5 à 4 ans), d'une meilleure progressivité dans la rencontre de la demande en électricité et d'un financement plus facilement mobilisable que les grands sites. Ces derniers nécessitent des développements plus longs (6 à 10 ans), des financements conséquents (> 450 MUSD) et peuvent rencontrer des contraintes socio-environnementales sévères. Etant donné la possibilité de substitution thermique et la future augmentation de la demande sur le RIA, ces sites de petite hydraulique garderont tout leur attrait même dans le cas où un grand site est développé.

Les futurs plans de développement énergétiques de Madagascar devront se pencher sur une meilleure articulation et planification de toutes les énergies (renouvelables et thermiques) pour encourager l'émergence des projets et l'attractivité des investissements, qu'ils soient publics ou privés. Des scénarios devront aborder les possibilités d'interconnexion des trois réseaux existants (RIA, RIF, RIT) et de phaser leur développement afin de ne pas rendre obsolètes de petits sites hydroélectriques qui deviendraient peu ou pas compétitifs face aux grands aménagements interconnectés.

Les futurs plans de développement devront, à la lumière de l'évolution de la demande, intégrer l'ensemble des sites hydro-électriques déjà connus et étudiés, répartis sur l'ensemble du territoire de Madagascar, les meilleurs sites prometteurs retenus dans la présente étude et les autres sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, ...) qui constitueront un portefeuille complet de projets. Dans tous les cas de figure, l'extension des réseaux interconnectés existants devra être clairement défini et matérialisé sur carte afin de ne pas compromettre le développement de sites isolés généralement plus petits et moins compétitifs.

Les opportunités d'aménager l'une ou l'autre rivière en cascade y compris avec un réservoir amont pour permettre la modulation journalière et interannuelle devraient être analysées dans le détail. Ce type d'aménagement permet généralement de réaliser des économies d'échelle (accès, lignes, etc.) et d'optimiser les infrastructures hydrauliques.



La petite hydro à Madagascar se compose de plus de 350 sites potentiels de 1 à 20 MW avec une capacité cumulée d'environ 1350 MW

Madagascar dispose d'un grand potentiel de petits sites hydroélectriques pour des investissements privés ou gouvernementaux

Potentiel de la petite
hydroélectricité à Madagascar

3. Potentiel de la petite hydroélectricité à Madagascar

La base de données des sites hydroélectriques potentiels à Madagascar est constituée de deux sources principales d'information décrites dans les paragraphes ci-dessous : (i) la **littérature reprenant diverses études** et listes ainsi que (ii) un **logiciel d'analyse spatiale** permettant d'identifier les tronçons de rivière à fort potentiel hydroélectrique sur base de la pluviométrie et de la topographie. Ce logiciel, SiteFinder, est un outil développé par SHER Ingénieurs-Conseils.

3.1 SITES IDENTIFIÉS À PARTIR DES INFORMATIONS EXISTANTES

Une synthèse de la littérature existante a été réalisée au travers de l'analyse de nombreuses études techniques, documents stratégiques, plans directeurs et listes.

Un résumé des documents analysés se trouve dans le Rapport Hydro Atlas (draft) ainsi que les cinq listes de sites potentiels qui ont été remises au Consultant. Le tableau ci-dessous résume la répartition des sites potentiels suivant la source de l'information.

SOURCE	NOMBRE DE SITES
Liste du secteur Energie ¹	501
Liste du Ministère de l'Energie	80
Liste ADER	780
Liste ORE (sites communs à d'autres listes)	67
Etudes diverses / littérature	109
TOTAL	1537 <i>(1470 si on décompte les sites de la liste ORE qui n'ont pas de coordonnées et sont communs aux autres listes)</i>

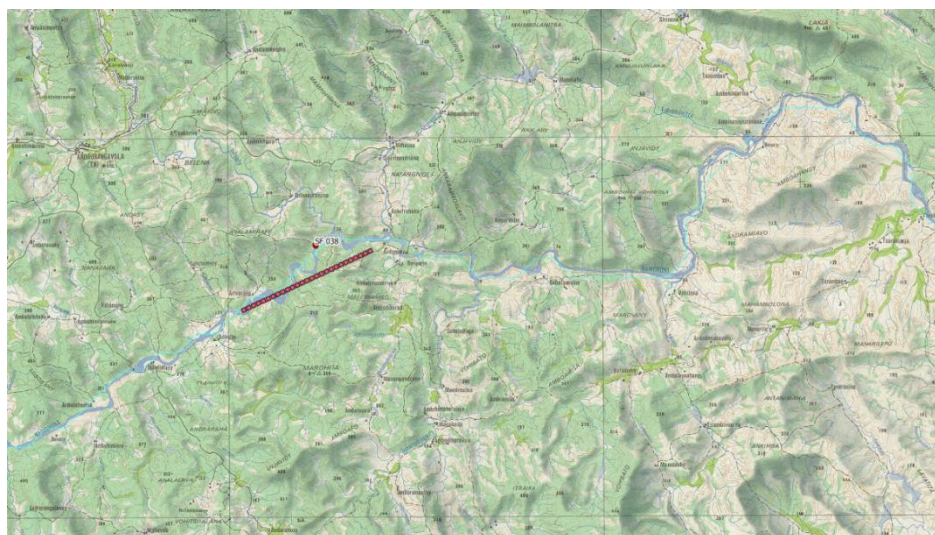
Ces listes, qui possèdent des sites en commun, présentent des coordonnées géographiques et quelques informations techniques telles que la puissance installée, une hauteur de chute brute ou un débit. Il est important de rappeler que les listes sont le plus souvent des synthèses de plusieurs documents. La plupart du temps, ces derniers ne sont pas ou plus disponibles. Très souvent, il existe des erreurs importantes sur le positionnement ou sur les paramètres techniques, et il n'est pas possible de remonter à l'origine de celles-ci et ni de les corriger. Aussi, il existe une grande incertitude sur les paramètres techniques, lorsqu'ils sont renseignés, car nous ne disposons généralement pas d'information sur les hypothèses qui ont permis de les déterminer.

¹ Liste provenant des archives de la Banque Mondiale

3.2 NOUVEAU SITES - CONTRIBUTION DE SITEFINDER : OUTIL DE DÉTECTION DE SITES HYDROÉLECTRIQUES

L'objet du logiciel SiteFinder développé par SHER Ingénieurs-Conseils est de détecter les chutes d'eau naturelles ou les portions de rivière à forte pente, associées à un débit, pour faire ressortir les tronçons favorables au développement de l'hydro-électricité. Le programme se base principalement sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et sur un certain nombre de données climatiques et/ou hydrologiques.

Le principe de base du programme est de détecter les chutes d'eau associée à une taille de bassin versant fixée suivant les besoins de l'étude. Le débit moyen des rivières est estimé à partir de la taille du bassin et/ou des données de répartition de la pluviométrie annuelle moyenne. Le programme déduit la puissance spécifique pour chaque tronçon de rivière. Ces résultats, affichés à l'écran, permettent d'identifier les sites potentiels. Un exemple de résultat (Site potentiel SF038), reporté sur la carte topographique, est présenté à la figure ci-dessous.



Un total de 575 sites a ainsi été détecté.

SOURCE	NOMBRE DE SITES
SiteFinder	575 <i>(dont 412 n'ont pas d'équivalence avec des sites déjà répertoriés)</i>

Parmi ces 575 sites détectés, 163 sites avaient déjà été abordés dans des documents existants dont 109 sites répertoriés dans la liste des sites potentiels de l'ADER. SiteFinder a donc permis d'**inclure un total de 412 nouveaux sites** à la base de données de sites hydroélectriques potentiels.

3.3 INTÉGRATION DES SITES PRÉALABLEMENT IDENTIFIÉS ET DES NOUVEAUX SITES DANS UNE BASE DE

DONNÉES UNIQUE

La base de données provenant de l'intégration de l'information provenant des différentes sources contient 2045 sites hydroélectriques potentiels (1470 provenant de la littérature et 575 identifiés par SiteFinder).

La base de données a été nettoyée manuellement de 744 doublons et sites ne présentant aucune donnée concernant la hauteur de chute brute, le débit et la puissance. La **BASE DE DONNÉES BRUTE** comporte finalement un nombre de **1301 sites potentiels recensés toute puissance confondue**. Notons cependant que de nombreux sites peuvent encore se retrouver en plusieurs exemplaires étant donné les erreurs liées aux coordonnées géographiques et à la toponymie. Les données collectées ne réfèrent aucune indication quant à la source d'information et l'auteur de l'étude.

3.4 PRODUCTION DE LA BASE DE DONNÉES FINALE

La totalité des 1301 sites recensés à partir des sources décrites ci-dessus ont fait l'objet d'une analyse sur base d'images satellite, de cartes topographiques, géologiques et d'une étude hydrologique régionale afin de juger du caractère favorable ou non de chaque site pour le développement d'un aménagement hydroélectrique.

Cette analyse a notamment permis une évaluation/confirmation de la chute brute disponible, de la taille du bassin versant drainé par le site, des contraintes de développement évidentes en raison de la présence de village, de zones protégées, de terrains militaires, etc.

Les cartes géologiques ont donné une première indication sur la nature des roches en présence, des éventuels accidents tectoniques et présence de failles qui pourrait complexifier la mise en œuvre d'un aménagement hydroélectrique.

Le résultat est une base de données consolidée contenant 403 sites hydroélectriques potentiels répartis sur la Grande Îles (de toute puissance confondue).

Sur base de ces éléments, une estimation de la puissance potentielle de chacun des sites a été réalisée, considérant un débit d'équipement correspondant au débit médian interannuel, estimé sur base d'une étude hydrologique régionale.

3.5 POTENTIEL DE LA PETITE HYDROÉLECTRICITÉ CONSOLIDÉ (1-20 MW)

Le potentiel hydroélectrique de Madagascar est important et encore largement sous-exploité. Des opportunités existent dans toutes les gammes de puissance. L'analyse montre que Madagascar dispose d'un grand potentiel de petits sites hydroélectriques pour des investissements privés ou gouvernementaux.

Sans considération technique ou économique, la petite hydro à Madagascar se compose de plus de 350 sites potentiels de 1 à 20 MW avec une capacité cumulée d'environ 1350 MW.

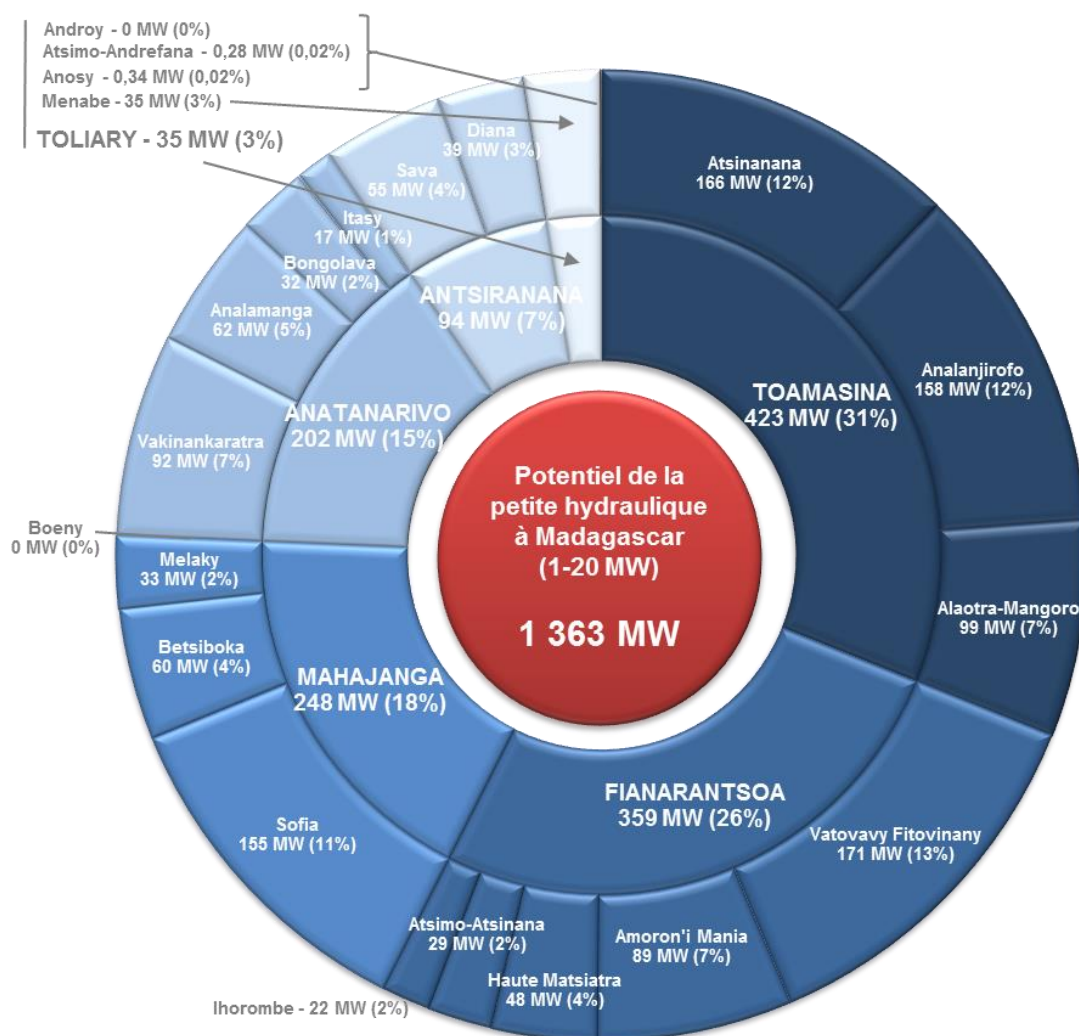


Figure 1. Potentiel de la petite hydroélectricité par province et par région

Plus de la moitié de ce potentiel est concentré dans les provinces de Toamasina (31%) et de Fianarantsoa (26%) dont les caractéristiques topographiques et météorologiques favorables ont été mises en évidence au Chapitre 2. Ces deux provinces totalisent 582 MW potentiels. Les provinces de Mahajanga, Antananarivo, Antsiranana et Toliary contribuent respectivement à 18%, 15%, 7% et 3% du potentiel en petite hydraulique.

Les **petites centrales hydroélectriques (1-20 MW)** constituent actuellement une belle opportunité pour le développement de la production d'électricité à court terme.



Priorisation des petits sites hydroélectriques

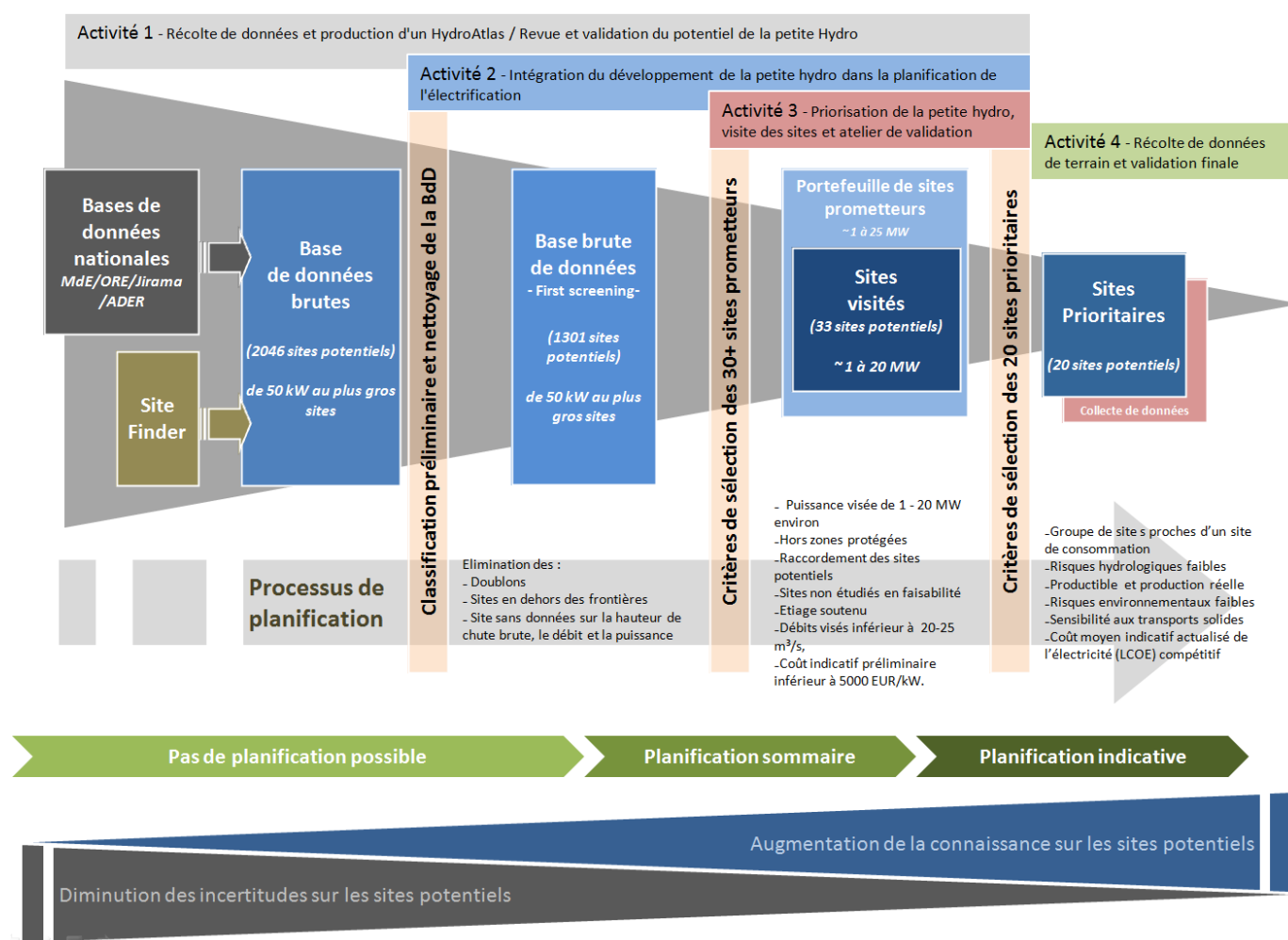
4. Priorisation des petits sites hydroélectriques prometteurs

4.1 PROCESSUS D'IDENTIFICATION ET SÉLECTION DES SITES PROMETTEURS

Un travail de fond a été mené pour établir un portefeuille de projets hydro-électriques correspondant aux critères de l'étude. Ce travail s'est déroulé en concertation étroite avec le Ministère de l'Energie et les organismes rattachés et dans le respect des termes de références de l'étude. Les critères retenus, et présenté ci-dessous, ont été débattus et validés à plusieurs reprises lors de la mission de présentation du rapport de démarrage et lors de réunions techniques.

Le gouvernement de Madagascar a fortement insisté dès le démarrage de l'étude pour que les projets puissent suivre la philosophie de développement de projet à moindre coût. Ce facteur économique a été intégré dès les premiers stades du processus malgré les contraintes liées au caractère lacunaire et hétérogène des données.

Le diagramme suivant présente le processus d'étude de manière schématique. Il apparaît que l'avancement du processus d'étude réduit, en fonction des critères préalablement déterminés, le nombre de site et qu'en parallèle, l'information et la connaissance sur les sites potentiels augmente.



Notons également que le processus de planification est un processus dynamique et itératif qui va en s'affinant en fonction de l'augmentation de la connaissance sur les sites potentiels.

- Base de données brute et nettoyée : **Aucune planification n'est possible** car l'incertitude sur les données techniques et les coordonnées des sites est maximale.

Pour exemple, le site AD158-Vohipary a une puissance de 3,7 MW dans le listing du secteur énergie, une puissance de 1,38 MW dans le listing de l'ORE, une puissance de 18,7 MW dans le listing du Ministère de l'Energie et une puissance recalculée après visite de site à 38,9 MW.

- Portefeuille de sites potentiels qui correspondent aux critères d'étude : **une planification sommaire est possible** qui tient compte de la distance de raccordement des sites soit à l'un des trois réseaux interconnectés (Antananarivo-Antsirabe - RIA, Toamasina - RIT et Fianarantsoa - RIF) soit à un centre isolé déjà équipé d'un groupe thermique.
- Sites prometteurs visités : **une planification indicative est possible** car une partie des inconnues techniques sur les sites potentiels sont levées. Les calculs de puissance, de production et de coûts permettent d'envisager de manière réaliste des hypothèses de raccordement. Cette planification pourra permettre à terme d'intégrer ces projets dans un futur Plan national électrique.

4.2 RÉSULTATS DE LA SÉLECTION ET PORTEFEUILLE DE PROJETS HYDRO-ÉLECTRIQUES 1-20 MW

Le décompte suivant reprend les critères tels qu'ils ont été appliqués dans le processus de sélection des sites prometteurs.

CRITÈRES DE L'ÉTUDE	NOMBRE DE SITES POTENTIELS RETENUS
Base de données Brute des sites hydro-électriques potentiels de Madagascar	1301 sites
- 168 sites avec une puissance et un débit manquant ou une dénivelée nulle	1133 sites
- 5 sites existants	1128 sites
- 36 sites de puissance > 25 MW	1092 sites
- 646 sites de puissance < 800 kW (ou < 700 kW pour les sites SiteFinder)	446 sites
- 80 sites situés en zone protégée	366 sites
- 305 sites avec un coût de construction estimé au kW installé > 5000 EUR/kW	61 sites
- 12 sites, ne présentant aucune caractéristique favorable ont été retirés de la liste finale après une analyse qualité réalisée par un ingénieur senior hydro-électricité.	49 sites

A l'issue du processus de sélection, un portefeuille de 49 sites les plus prometteurs a pu être identifié. L'étape suivante a consisté à retenir, parmi ce portefeuille de 49 sites, les meilleurs sites potentiels à visiter durant l'activité 3.

A ce stade de l'étude, étant donné l'absence de visites et de mesures permettant de confirmer les paramètres techniques des sites, il n'est pas possible de tirer des conclusions techniques sur les 49 sites. Les données sont très lacunaires et peu précises. Il y a cependant assez d'éléments pour nous permettre d'affirmer qu'ils présentent un potentiel hydro-électrique dans le cadre de l'étude et qu'ils méritent une visite de terrain.

Le consultant a considéré les possibilités de raccordement soit au réseau, soit au centre isolé alimenté thermiquement le plus proche ainsi que l'accessibilité aux sites. Un focus particulier sur les sites **pouvant être développés à court terme par des investisseurs privés**. Ceux-ci constitueront probablement la part principale des prochains investissements productifs dans le secteur hydro-électrique.

9 sites parmi les 49 ont un accès très problématique et/ou une connexion au réseau en inadéquation avec leur puissance. Ces sites sont situés : soit à plus d'une journée de marche à pied à partir d'une piste, soit leur raccordement, en première approximation, est supérieur à 40 km. A moyen terme, on considère que ces sites ne seront pas visités tant que l'aménagement d'un accès raisonnable ne sera pas réalisé ou seront exclus des futures priorisations : des projets plus proches ou une extension du réseau existant leurs étant préférés.

7 sites parmi ces 49 sont situés dans des zones classées rouge du point de vue sécuritaire. Pour des raisons évidentes de sécurité, ces sites n'ont pas été visités durant la période d'étude. Ils gardent cependant leur intérêt intrinsèque et pourront faire l'objet d'investigations, dans le cadre d'études futures, lorsque le niveau de sécurité sera à nouveau favorable.

La liste finale de sites à visiter comporte 33 sites prometteurs.

4.3 MEILLEURS SITES PROMETTEURS POUR UN INVESTISSEMENT À COURT TERME

ETUDE HYDROLOGIQUE CIBLÉE POUR LES 33 SITES PROMETTEURS

L'objectif de l'étude hydrologique est d'estimer les caractéristiques statistiques des séries temporelles de débits au niveau des 33 sites hydroélectriques préalablement identifiés comme les plus prometteurs au regard des objectifs de cette étude. Ces caractéristiques statistiques ont un rôle majeur pour l'estimation des paramètres techniques et économiques des schémas d'aménagement des sites hydroélectriques ainsi que leur planification de développement et type de raccordement.

Pour la majorité des sites étudiés dans cadre de cette étude, il n'existe pas ou peu d'information précise sur leur régime hydrologique. Par conséquent, nous avons développé une méthodologie permettant d'obtenir une estimation indicative des caractéristiques statistiques des débits aux sites d'intérêt, à partir de données disponibles à d'autres stations de mesure de débit réparties sur le territoire de Madagascar.

En conséquence, la résolution temporelle et spatiale de l'information disponible sur les débits des rivières à Madagascar qui ont un intérêt dans le cadre de cette étude, ainsi que la méthodologie d'analyse qui en découle, ne permettent que d'avoir une estimation indicative des caractéristiques hydrologiques des sites d'intérêt. Ces dernières ne peuvent en aucun cas

être utilisées pour le dimensionnement d'infrastructures sans études hydrologiques complémentaires.

EVALUATION ÉCONOMIQUE PRÉLIMINAIRE DES MEILLEURS SITES PROMETTEURS POUR UN INVESTISSEMENT À COURT TERME

Les productions attendues et les coûts de projet ont été calculés à partir des caractéristiques de l'aménagement prévu, du contexte local et de l'hydrologie. À partir de la production et du coût, les LCOE (Levelized Cost of Energy - coût actualisé de l'énergie) ont été déduits pour chacun des sites permettant ainsi une comparaison harmonisée des sites.

VISITE DES SITES PROMETTEURS

À la suite du processus de sélection, les visites de terrain ont permis, outre une meilleure appréciation du site, de relever les diverses données nécessaires à l'évaluation du potentiel hydroélectrique des différents sites et d'en déterminer un coût préliminaire.

Les visites ont eu lieu entre la fin septembre 2014 et la fin novembre 2014, soit une période de 2 mois. Le travail de reconnaissance a été mené par plusieurs équipes d'experts. Des équipes du Ministère de l'Energie et des organismes rattachés ont accompagné les experts du Consultant sur le terrain dans la semaine du 27 septembre 2014.

Les données pour chacun des sites peuvent être classées en données primaires (mesurées sur site) et données secondaire (dédiées des données primaires).





11 sites totalisant 130 MW au total ont été identifiés comme sites potentiels prioritaires d'intérêt pour le développement à court terme. Cela permettra d'accroître l'alimentation en courant de 950 GWh/an.

Sites à développer dans le court terme

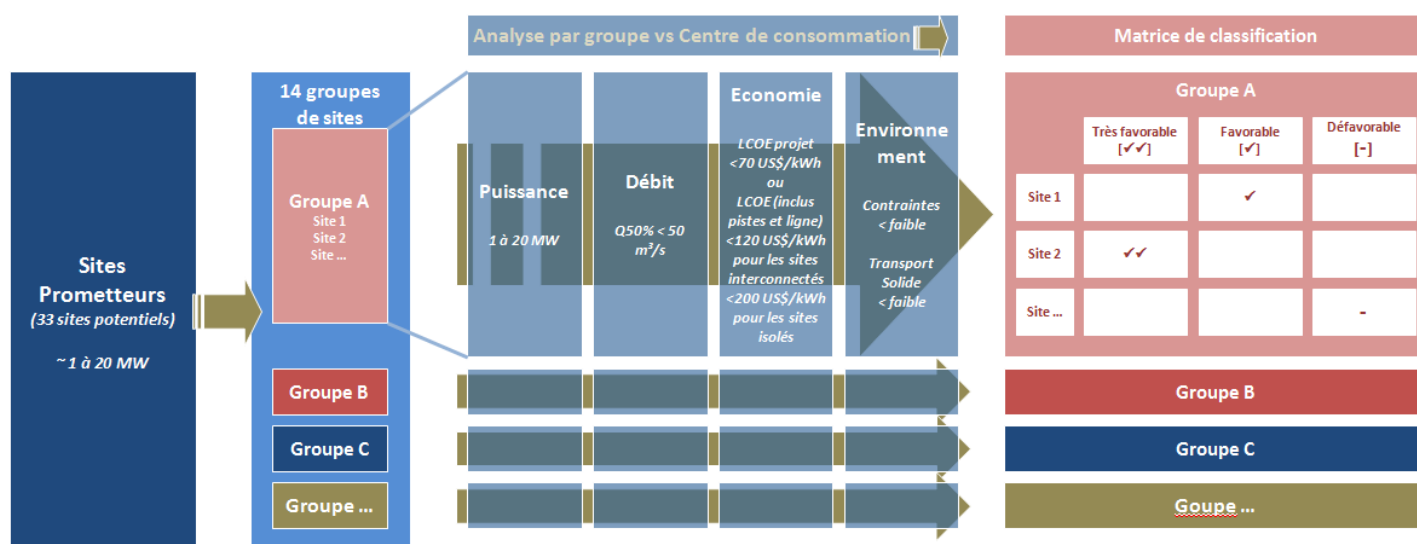
5. Sites à développer dans le court terme

CRITÈRES DE SÉLECTION DES 20 SITES PRIORITAIRES POUR UN DÉVELOPPEMENT À COURT TERME

Pour la sélection des 20 sites prioritaires, nous avons ensuite procédé par groupe d'ouvrages situés dans un même secteur géographique pouvant être connecté soit à un réseau existant soit à un centre isolé équipé d'un groupe thermique. En effet, tous les sites qui sont proches les uns des autres vont être en concurrence directe pour alimenter les mêmes centres de consommation. Il convient donc de les prioriser dans cette logique.

Les critères retenus pour réaliser la sélection des 20 sites prioritaires sont présentés dans la grille ci-dessous :

1. Groupement de sites pour un même centre ou réseau de distribution/consommation;
2. Puissance prévue comprise entre 1 et 20 MW;
3. $Q_{50\%}$ et ouvrages hydrauliques adaptés à la petite hydraulique [$Q_{50\%} < 50 \text{ m}^3/\text{s}$];
4. LCOE (hors accès et hors lignes) $< 70 \text{ US}\$/\text{MWh}$ ou LCOE (avec accès et lignes) $< 120 \text{ US}\$/\text{MWh}$ (Réseau interconnecté) ou $< 200 \text{ US}\$/\text{MWh}$ (Site isolé);
5. Pas de contrainte environnementale évidente y compris le transport solide.



Nous passons en revue ci-dessous les 5 critères retenus :

Groupement de sites pour un même centre ou réseau de distribution/consommation

Les projets sont groupés par possibilité de connexion au centre de consommation le plus proche, soit un des 3 réseaux interconnectés, soit un réseau isolé équipé d'un groupe électrogène.

Puissance prévue comprise entre 1 et 20 MW

Ce critère est clairement énoncé dans les termes de référence. A noter cependant que ce critère avait été légèrement adapté lors des phases précédentes étant donné la grande incertitude sur les données collectées. Nous ne voulions pas risquer d'éliminer de bons projets. Remarquons tout de même que certains sites sont situés dans des régions où l'incertitude sur les données hydrologiques est très grande, ce qui peut avoir une influence positive ou négative sur la capacité installée ou la production.

$Q_{50\%}$ et ouvrages hydrauliques adaptés à la petite hydraulique [$Q_{50\%} < 50 \text{ m}^3/\text{s}$]

Afin de rester dans les gammes de débits et d'équipements qui relèvent de la petite hydraulique, il est recommandé de ne pas dépasser $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Au-dessus de ces débits, les projets commencent à être plus complexes : les crues importantes nécessitent des dimensions d'ouvrages d'évacuation de crue adaptées, les ouvrages de transport d'eau deviennent conséquents et les risques budgétaires plus importants.

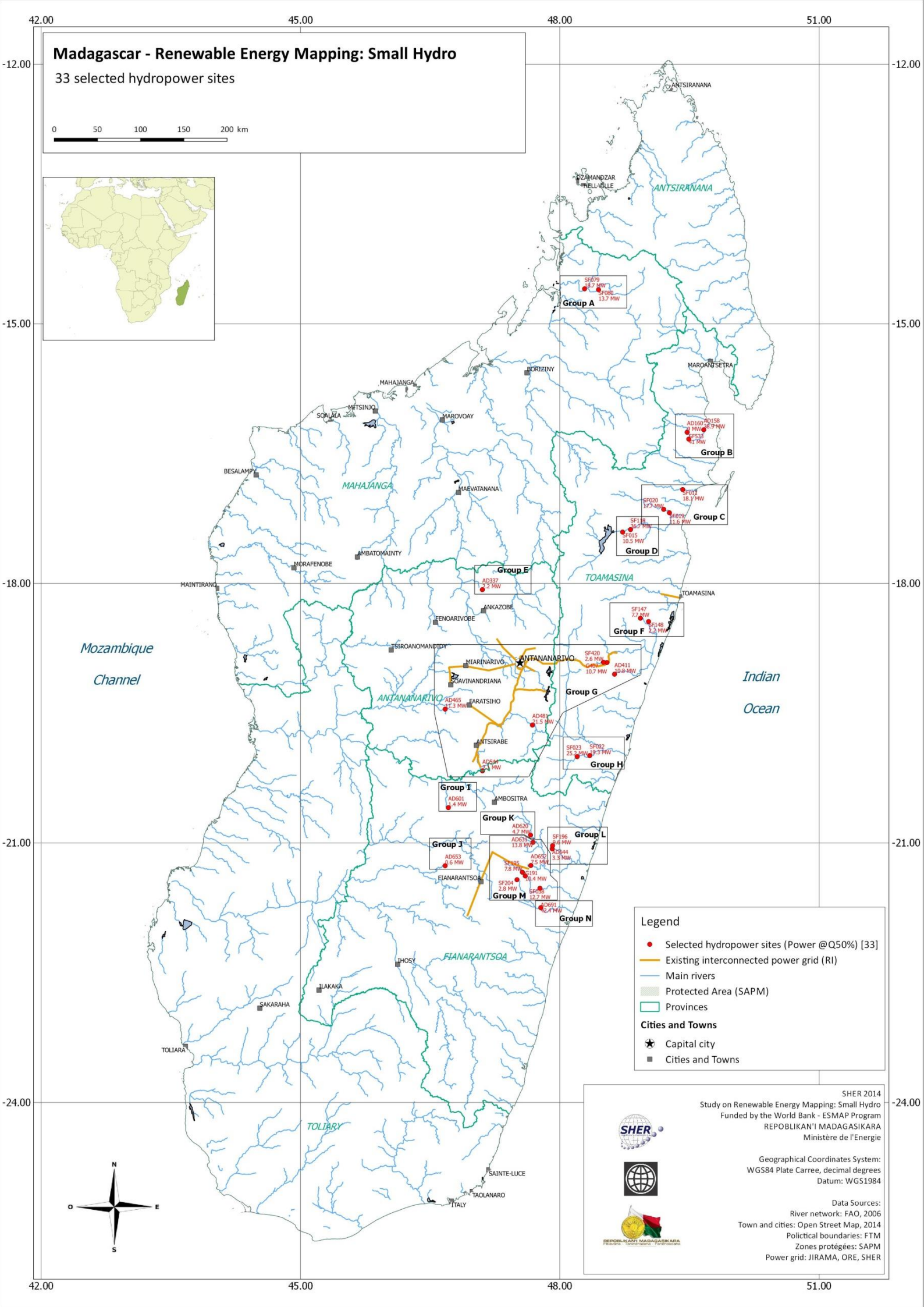
LCOE (hors accès et hors lignes) < 70 US\$/MWh ou LCOE (avec accès et lignes) < 120 US\$/MWh

Le consultant, dans le respect des contraintes économiques, a fixé un seuil de maximum 70 US\$/MWh en tenant compte uniquement du projet sans les coûts d'accès et de raccordement (ce qui en fait un bon projet ou pas). De manière conservatrice nous retenons la position intermédiaire dans la fourchette des coûts au kWh de la JIRAMA 2011 (40 à 100 US\$/MWh) soit 70 US\$/MWh.

Un deuxième indicateur économique consiste à regarder le LCOE du projet incluant les coûts d'accès et de raccordement au réseau ou à un centre isolé. Nous retenons comme plafond 120 US\$/MWh pour les sites pouvant être raccordés à un des trois réseaux interconnectés et 200 US\$/MWh pour les sites isolés connectés à un groupe thermique.

Pas de contrainte environnementale évidente y compris le transport solide

Les visites de sites nous ont permis d'identifier des critères immédiatement identifiables limitant le développement des sites potentiels prometteurs. Citons, la mitoyenneté avec une zone protégée, la présence de Lavaka ou encore un transport solide important même en saison sèche.



RÉSULTATS DE LA SÉLECTION : 20 SITES PROMETTEURS

Le tableau ci-dessous résume la sélection de sites prioritaires telle qu'elle est proposée par le consultant.

NOM	GROUPE	RIVIÈRE	BASSIN VERSANT (KM ²)	Q _{50%} (M ³ /s)	H _{BRUTE} (M)	PUISSANCE @ Q _{50%} (MW)	ENERGIE @ Q _{50%} (GWH/Y)	CAPEX LIGNE ET ACCÈS INCLUS (MUS\$)	LCOE @ Q _{50%} (US\$/MWH)	LCOE @ Q _{50%} + LIGNE +ACCÈS (US\$/MWH)	CONTRAINTE ENVIRONNEMENTALE
Ilengy - B	B	Mananara	1727,7	45,28	24,0	9,0	66,8	66,2	53,1	120,0	Transport solide modéré
SF011	C	Marimbona	1408,6	39,76	55,0	18,1	134,5	90,7	64,0	81,3	Faible
SF019		Sandratsiona	2419,6	38,84	36,0	11,6	84,0	70,2	60,9	100,8	Transport solide modéré
SF020		Sandratsio	2093,4	23,82	90,0	17,7	126,2	80,1	42,1	77,4	Faible
SF015	D	Maningory	8109,6	46,92	27,0	10,5	69,7	41,8	52,4	72,8	Transport solide modéré
SF118		Maningory	8422,6	48,73	91,0	36,7	243,6	97,1	38,2	48,9	Transport solide modéré
SF147	F	Iovay	120,1	5,50	170,0	7,7	57,8	55,1	54,7	115,3	Faible
SF148		Morongolo	216,7	10,98	24,0	2,2	16,4	28,0	64,3	205,4	Transport solide modéré
Ambodimanga	G	Laroka	179,6	10,68	123,0	10,8	81,9	31,0	36,7	46,3	Faible
Analamanaha		Analamanaha	54,1	0,74	350,0	2,1	15,0	14,3	97,7	114,3	Compétition irrigation
Fanovana		Sanatanora	496,4	18,95	68,0	10,7	80,0	26,0	33,8	39,9	Faible
Antaralava	I	Imorona	463,2	5,45	32,0	1,4	10,2	9,6	69,7	114,0	Transport solide modéré / compétition irrigation
Vohinaomby	J	Antsakoama	381,1	3,27	22,0	0,6	4,1	6,1	117,7	175,8	Transport solide modéré
Behingitika	K	Manandriana	267,7	12,48	45,0	4,7	35,0	17,1	43,5	59,6	Faible
SF196		Besana	117,4	7,67	151,0	9,6	72,2	32,0	34,1	54,4	Faible
Antanjona	M	Sahanofa	393,6	14,86	112,0	13,8	103,2	48,6	42,4	57,3	Faible
Tambohorano		Faravory	413,6	21,72	42,0	7,5	56,8	27,7	51,2	58,9	Faible
Andriamanjavona		Namorona	813,2	20,52	61,0	10,4	76,8	30,4	43,6	48,1	Faible
SF038A		Namorona	1224,6	43,83	35,0	12,7	95,2	46,6	45,3	59,5	Faible
SF195		Namorona	784,2	18,92	50,0	7,8	58,1	25,7	34,3	54,4	Faible

Les hauteurs de chute brute varient de 22 m pour la plus faible à 350 m pour la plus importante. Le bassin versant moyen est de 1500 km², le plus petit ayant une surface de 54 km² et le plus grand 8420 km². Les débits (Q_{50%}) varient de 0,75 m³/s à 48 m³/s.

Nous pouvons observer dans le tableau ci-dessus que les 20 projets prioritaires de petites hydro ont un LCOE (hors ligne et accès) moyen de 54 US\$/MWh compris dans une fourchette entre 33.8 US\$/MWh et 117.7 US\$/MWh et un LCOE (y compris ligne et accès) moyen de 85 US\$/MWh compris dans une fourchette entre 39.9 US\$/MWh et 205.5 US\$/MWh.

Les coûts d'investissement (CAPEX y compris accès et lignes) sont en moyenne de 42 MUS\$ avec le plus petit projet à 6.1 MUS\$ pour une capacité de 600 kW et le plus grand projet à 97.1 MUS\$ pour une capacité de 36.7 MW.

La puissance cumulée des 20 sites prioritaires est de 205 MW pour un productible cumulé de 1490 GWh/an. Ces projets pourraient contribuer à augmenter la capacité actuellement installée (552 MW) d'environ 37 % pour des investissements d'environ 844 MUS\$. Ces 20 projets pourraient venir en énergie de substitution au thermique (389 MW) à raison d'environ 53 % si l'on considère le nominal, mais plus de 100% si l'on considère le disponible (188 MW).

11 SITES RECOMMANDÉS POUR INTRODUIRE PLUS DE PETITE HYDRO DANS LES PLANS À MOINDRE COÛT

Il est assez difficile de justifier des projets de petite hydraulique dans un schéma directeur au moindre coût d'un réseau interconnecté. Cela est principalement dû :

- à leurs coûts de production relativement plus élevés,
- au fait que le coût des lignes et accès représente rapidement une part trop importante des investissements totaux du projet,
- au fait que la puissance garantie et la production durant les périodes de basses eaux est souvent faible, ce qui est pénalisant par rapport aux centrales thermiques auxquelles on les compare.

Introduire plus de projets de petite hydro dans les plans au moindre coût présente cependant plusieurs intérêts. En effet, dans un pays avec une faible demande énergétique, l'introduction de petits projets permet de répondre à l'accroissement de la demande de manière plus adaptée.

- L'augmentation annuelle de la demande énergétique étant de l'ordre de la dizaine de MW, un projet de petite hydro est de la bonne taille pour répondre à cet incrément.
- En moyenne les projets de petite hydro seront plus rapides à développer que ceux de large hydro (un temps d'étude raccourcis et une phase de construction et de mobilisation pour la recherche des financements plus rapide).

Ainsi, même si sur le long terme il sera sans doute plus intéressant d'intégrer des projets de grande taille dans les plans de développement au moindre coût (coût de production plus faibles), l'introduction de projet de petite hydro a tout son sens et pourrait remplacer partiellement les investissements dans des centrales thermiques en début de plan.

Le tableau ci-après récapitule les projets les plus intéressants identifiés grâce à la présente étude, dont les coûts de production restent attractifs par rapport au thermique. A titre indicatif, les coûts moyens des combustibles de la JIRAMA étaient en 2012 de 338 \$/MWh pour le gasoil (carburant utilisé majoritairement pour les centres de consommation isolés) et 208 \$/MWh pour le HFO (carburant utilisé sur le réseau interconnecté). Les coûts des hydrocarbures ont connu une baisse très importante récemment sur le marché mondial, mais dans le cadre d'une vision à plus long terme, les coûts de 2012 paraissent être un bon indicateur.

Le consultant a donc sélectionné ici les projets entre 5 MW et 18 MW, dont le LCOE est au maximum de l'ordre de 70-80 \$/MWh. On note de plus qu'il y a trois ouvrages qui sont situés en cascade sur le Namorona (SF195 / G191- Andriamanjavona / SF038), et qui pourront donc

voir leurs coûts de production baisser grâce à un effet de mutualisation, et leur production augmenter grâce à un effet de régularisation des débits.

Code	Nom	Groupe	Q _{50%} (m³/s)	H _{brute} (m)	Puissance @ Q _{50%} (MW)	Energie @ Q _{50%} (GWh/an)	CAPEX ligne et accès inclus (MUS\$)	LCOE + ligne +accès (US\$/MWh)	Connexion
SF011	SF011	C	39,76	55,0	18,1	134,5	90,7	81,3	Isolé
SF020	SF020		23,82	90,0	17,7	126,2	80,1	77,4	Isolé
SF015	SF015	D	46,92	27,0	10,5	69,7	41,8	72,8	Isolé
AD411	Ambodimanga	G	10,68	123,0	10,8	81,9	31,0	46,3	RIA
G407	Fanovana		18,95	68,0	10,7	80,0	26,0	39,9	RIA
SF196	SF196	L	7,67	151,0	9,6	72,2	32,0	54,4	Isolé
AD631	Antanjona	M	14,86	112,0	13,8	103,2	48,6	57,3	RIF
AD652	Tambohorano		21,72	42,0	7,5	56,8	27,7	58,9	RIF
G191	Andriamanjavona		20,52	61,0	10,4	76,8	30,4	48,1	RIF
SF038	SF038A		43,83	35,0	12,7	95,2	46,6	59,5	RIF
SF195	SF195		18,92	50,0	7,8	58,1	25,7	54,4	RIF
					130 MW	950 GWh/an			

Ces sites, à haute valeur ajoutée, peuvent introduire à terme une capacité de 130 MW dans le système électrique Malgache et un productible annuel de 950 GWh par an, ce qui correspond à un supplément de 80% de la capacité hydraulique installée actuellement (160 MW) et 17% de plus que la production hydraulique de 2013 (809 GWh). Ou encore un supplément de 67% de la production totale Malgache toute sources d'énergie confondue (1423 GWh en 2013).

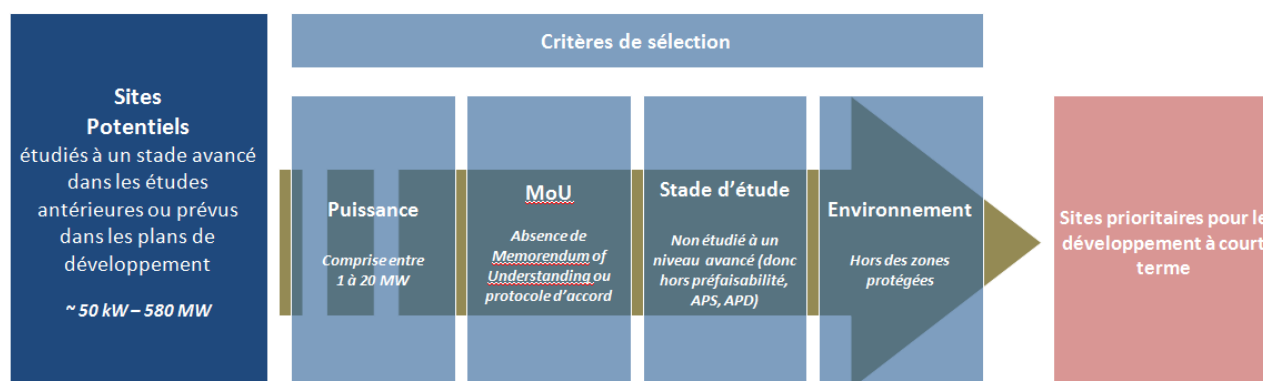
Notons que les 2 sites (AD411-Ambodimanga et G407-Fanovana) qui peuvent se connecter au réseau d'Antananarivo (RIA) sont compétitifs face aux projets d'Antetazambato (coût actualisé de 50 à 70 USD/MWh - Etude de pré faisabilité, 2013) et de Mahavola (52 EUR/MWh ~ 67 USD/MWh, Etude comparative de 6 projets, 2009). Ces sites peuvent en outre être aménagés dans des durées de développement plus courtes (2.5 à 4 ans) que celles liées aux grands projets qui nécessitent des développements plus longs (6 à 10 ans). Le développement d'Antetazambato a par exemple été planifié sur 7 ans.

Les sites pouvant alimenter le réseau de Fianarantsoa (RIF) gardent une bonne attractivité financière même dans le contexte d'une future interconnexion des 3 réseaux (RIA, RIT, RIF). A terme, si l'interconnexion prévue avec Manakara et Mananjary (RIFMM) se concrétise, ces sites pourront supporter le développement de ce réseau.

Dans l'ensemble, ces sites intéressent la JIRAMA ou le secteur privé via des mécanismes adéquats de partenariats public-privés.

SÉLECTION DE SITES POTENTIELS PROMETTEURS ÉTUDIÉS À UN STADE AVANCÉ DANS LES ÉTUDES ANTÉRIEURES OU PRÉVUS DANS LES PLANS DE DÉVELOPPEMENT

En parallèle au processus de sélection de nouveaux sites prometteurs, une analyse théorique a été menée concernant une sélection de sites prometteurs parmi ceux étudiés à un stade avancé dans les études antérieures ou prévus dans les plans de développement, qui correspondent aux critères d'étude. Le graphe suivant présente les critères qui ont été appliqués pour réaliser une sélection des meilleurs sites.



Les critères utilisés sont :

- Une puissance comprise en 1 et 20 MW;
- L'absence d'un Memorandum of Understanding (MoU) ou protocole d'accord signé entre un potentiel développeur et le gouvernement. A noter que la liste existant au niveau du Ministère de l'Energie pourrait être actualisée;
- Un stade d'étude faible. Les sites étudiés à un stade avancé, soit au niveau étude de pré faisabilité, étude de faisabilité, Avant-projet Sommaire (APS), Avant-projet Détaillé (APD), ne sont pas retenus;
- Les sites doivent se situer en dehors des zones protégées.

Le tableau ci-dessous présente les résultats du processus de sélection de sites prometteurs, répondants aux critères d'étude, parmi ceux étudiés à un stade avancé dans les études antérieures ou prévus dans les plans de développement. Ces 8 sites ont été visités dans le cadre de la Phase 2 (Ground-based data collection) afin d'en valider les caractéristiques techniques préliminaires.

CODE	NOM	RIVIERE	CHUTE BRUTE (m)	DEBIT Médian (Q _{50%}) (m ³ /s)	PUISSANCE (MW)
AD490	Andalona	Andratsay	12	15.8	1.6
G023	Ambatoharanana	Bemarivo	12	71.1	7.1
AD313	Ampondrokoh	Maheriara	18	1.2	0.173
AD342	Manankazo	Manankazo	40	1.8	0.594
AD354	Andriabe	Demoka	12	8.8	0.880
FR148	Vohibato	Mananara	21	88.9	15.5
G325	Antsiafampiana	Sahafihatra	5	11.1	0.46
G546	Marobakoly	Ajingo	5	22.4	0.93

3 SITES RECOMMANDÉS POUR DÉVELOPPER DES ZONES ISOLÉES

Plusieurs sites de la liste n'obtiennent pas des résultats très performants en terme économique. Cependant, ces sites sont proches de petits centres isolés qui ne seront pas interconnectés avant longtemps. Il faut donc les considérer de manière autonome et envisager leur développement en adéquation avec une demande qui va augmenter progressivement.

Code	Nom	Groupe	Q _{50%} (m³/s)	H _{brute} (m)	Puissance @ Q _{50%} (MW)	Energie @ Q _{50%} (GWh/y)	CAPEX ligne et accès inclus (MUS\$)	LCOE @Q _{50%} + ligne +accès (US\$/MWh)	Sélection
AD601	Antaralava	I	5,45	32,0	1,4	10,2	9,6	114,0	✓
AD653	Vohinaomby	J	3,27	22,0	0,6	4,1	6,1	175,8	✓
AD620	Behingitika	K	12,48	45,0	4,7	35,0	17,1	59,6	✓✓

Idéalement le développement de ce type de projets hydro-électriques doit être accompagné par l'ADER ou des partenaires au développement.

A noter que le site AD601 - Antaralava ne peut être envisagé que comme projet intégré irrigation/hydro-électricité car il est actuellement exploité à des fins d'irrigation via un seuil existant. Un aménagement intégré de ce site permettrait d'améliorer son LCOE en intégrant son potentiel économique agricole mais aussi son impact social.

Concernant le site AD620, notons que malgré un LCOE très intéressant, il faudra quelques années avant que la demande d'Ambodimanga du Sud et des villages alentours atteigne le productible disponible. Afin de ne pas 'gaspiller' le projet par un sous-dimensionnement de l'infrastructure, un phasage de celui-ci est recommandé (par exemple : réservation d'espace pour une conduite forcée et une turbine supplémentaire).

INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES ET SUIVI HYDROLOGIQUE

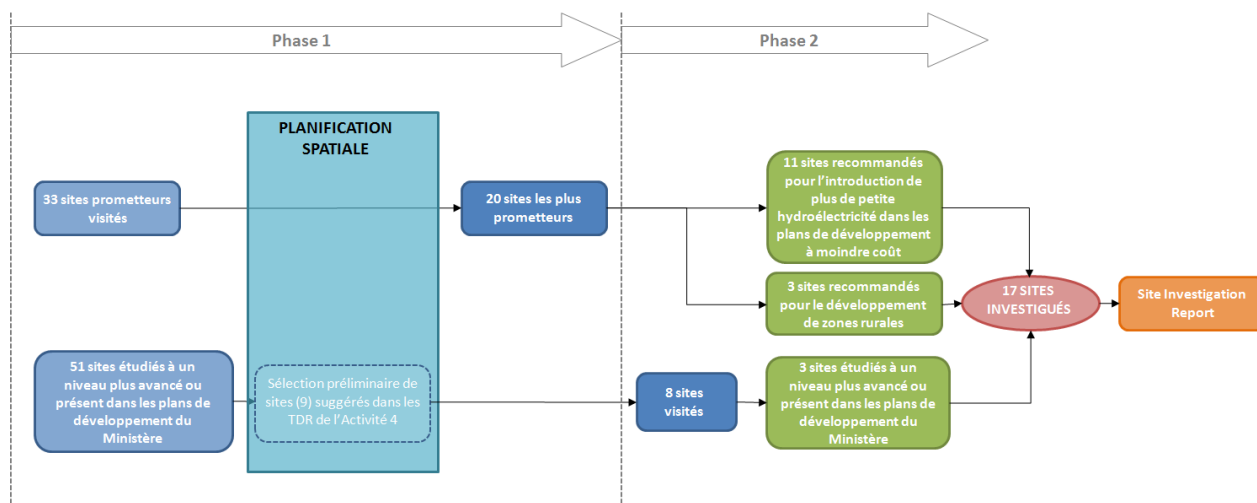
Des investigations complémentaires ont été réalisées dans le cadre de la Phase 2 (Ground-based data collection) de l'étude. Les résultats de ces investigations sont présentés dans le «*Site Investigation Report*» placé en Annexe E de ce rapport. Il vise à fournir une vue d'ensemble, au stade d'étude de Reconnaissance, des 17 sites potentiels de petite hydroélectricité les plus prometteurs à Madagascar.

La sélection des 17 sites est le résultat d'un processus réalisé au cours de la Phase 1 dont les résultats ont été validés lors de l'atelier tenu à Antananarivo en juin 2015 au Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures.

Cette sélection est issue d'un exercice complexe de planification spatiale qui s'est basé notamment sur des critères économiques, environnementaux et d'adéquation de l'offre et de la demande en énergie et constitue la liste des sites prioritaires pour un développement à court terme de la petite hydroélectricité à Madagascar. Parmi ces 17 sites, trois (3) ont été recommandés pour le développement de zones rurales isolées et trois (3) autres sites sont issus (après une visite des 8 sites potentiels rencontrant les critères établis en phase 1) des sites

potentiels étudiés antérieurement à un stade plus ou moins avancé (jusqu'au niveau APS) et/ou prévus dans les plans de développement du secteur énergétique par le Ministère de l'Energie.

Le processus de sélection présentant l'origine des 17 sites sélectionnés est illustré à la figure ci-dessous.



Les résultats présentés dans le « *Site Investigation Report* » sont fondés sur des investigations techniques préliminaires des sites qui incluent des visites de sites, des relevés topographiques (basé sur le traitement des images ortho-photogrammétriques acquises par un avion léger), la caractérisation de la géologie de surface et de l'environnement socio-économique ainsi qu'une étude hydrologique régionale.

Parallèlement à ces investigations complémentaires, six stations hydrométriques ont été installées avec succès sur les six rivières sélectionnées à Madagascar. Ces installations ont permis le suivi des hauteurs d'eau ainsi que l'établissement des courbes de tarage préliminaires sur une année hydrologique complète.

La localisation des six stations est présentée dans le tableau **Error! Reference source not found.** ci-dessous.

RIVIÈRE (BASSIN VERSANT MAJEUR)	NOM DU SITE	LONGITUDE [DD]	LATITUDE [DD]	SUPERFICIE BASSIN VERSANT [km²]	DATE D'INSTALLATION
Besana (bassin de la Mananjary)	SF196 (Mahatsara)	47.915	-21.03	124.9	22/10/2015
Sahatandra (bassin de la Rianila)	G407 (Fanovana)	48.533	-18.919	511.7	18/10/2015
Namorona (basin de la Namorona)	G191 (Namorona 2)	47.597	-21.378	862.3	20/10/2015
Manandriana (bassin de la Mananjary)	AD620 (Amohimanga du Sud)	47.592	-20.876	250.2	25/10/2015
Marimbona (bassin de la Marimbona)	SF011 (Fotsialanana)	49.458	-16.92	1495.4	21/10/2015
Sandratsiona (bassin de la Maningory)	SF020 (Ambatoharanana)	42.212	-17.151	2389.3	23/10/2015

Les enregistrements couvrent une année hydrologique complète (sauf pour la rivière Marimbona), d'octobre 2015 à octobre 2016, qui semble être particulièrement déficitaire cette

année. Il est par conséquent important de poursuivre le suivi hydrologique de ces rivières afin de pouvoir mieux caractériser la dynamique hydrologique de ces cours d'eau durant les années normales et plus humides. En effet, seuls de longs historiques de mesures hydrologiques (au-delà de 20 années de mesure) sont pertinents pour le dimensionnement de projets d'infrastructures tels que des aménagements hydroélectriques.

Il est fortement recommandé que le Gouvernement de Madagascar mette en place rapidement un réseau de suivi hydrologique de ses rivières à fort potentiel hydraulique, afin de mieux appréhender la ressource en eau disponible et ainsi favoriser le développement de projets hydroélectriques à travers le pays. Ce n'est en effet que dans un contexte d'incertitudes réduites au travers de données hydrologiques fiables, récentes et acquises sur de longues périodes (plus de 20 années) que les paramètres techniques et les analyses économiques et financières des aménagements hydroélectriques peuvent être définis précisément, permettant une optimisation de leur conception et une maîtrise des crues de dimensionnement des infrastructures (temporaires et permanentes).

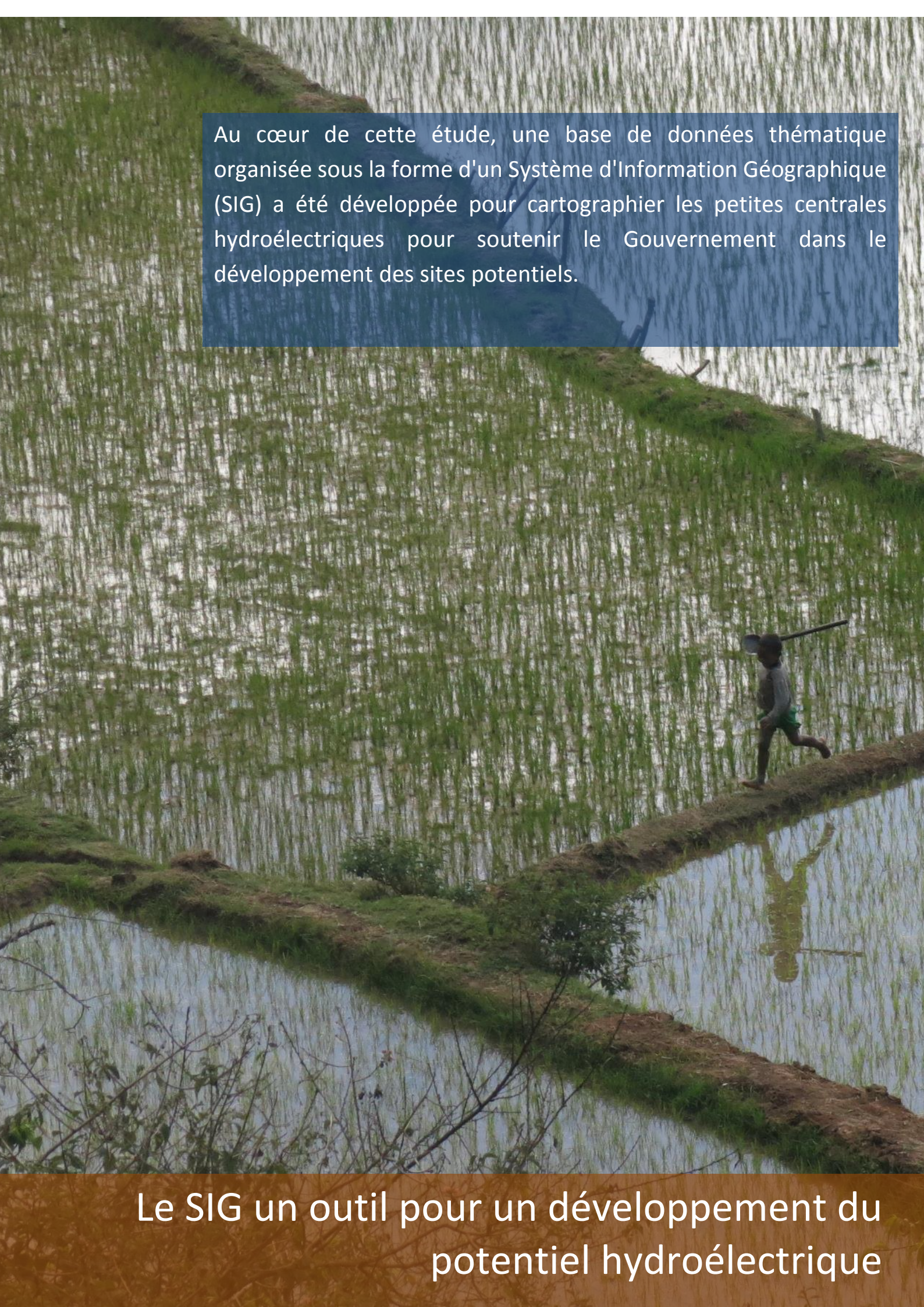
Un « *Hydrological Resource Report* » a été produit dans le contexte de la Phase 2 (Ground based data collection) et vise à donner un aperçu du réseau de suivi hydrologique mis en place dans le contexte de cette étude ainsi qu'à commenter les données hydrologiques collectées. L'entièreté des activités réalisées ainsi que les résultats sont décrits dans ce Rapport placé en Annexe F de cet Executive Summary.

ETUDES DE PRÉFAISABILITÉ DE DEUX AMÉNAGEMENTS HYDROÉLECTRIQUES

Dans le cadre de la Phase 2 (Ground-based data collection), deux sites potentiels ont fait l'objet d'une étude de préfaissabilité. Les 2 sites sélectionnés pour être étudiés dans les études de préfaissabilité sont issus de la liste des 17 sites potentiels recommandés pour le développement de la petite hydroélectricité à Madagascar.

La sélection des deux sites a été réalisée par analyse multicritères se basant sur les informations et données supplémentaires acquises durant la réalisation d'investigations de terrain (Phase 2), notamment relatives à la topographie, géologie de surface ainsi que les aspects environnementaux et sociaux. En concertations avec l'ensemble des acteurs du projet, les discussions concluent que les sites suivants sont retenus pour les études de préfaissabilité : G407 (Fanovana) et SF196 (Mahatsara) dont les principales caractéristiques sont reprises dans le tableau ci-dessous.

CARACTÉRISTIQUES	FANOVANA	MAHATSARA
Région	Alaotra-Mangoro	Vatovavy Fitovinany
Rivière	Sahatandra	Besana
Superficie du bassin versant	520 km ²	125 km ²
Débit d'équipement	16.0 m ³ /s	6.2 m ³ /s
Type d'aménagement	Fil de l'eau	Fil de l'eau
Puissance installée	9.23 MW	7.3 MW
Productible annuel moyen	61.78 GWh/y	47.8 GWh/y
CAPEX - hors lignes et accès existant à réhabiliter	13.63 M€	15.92 M€
LCOE - hors lignes et accès existant à réhabiliter	0.0264 €/kWh	0.0497 €/kWh

A photograph of a person walking across a narrow earthen path that stretches over a vast, flooded rice field. The water in the field is shallow and reflects the sky and the surrounding greenery. The person is wearing a light-colored shirt and dark shorts, and is carrying a long pole or stick over their shoulder. The background shows more of the flooded field and some distant trees.

Au cœur de cette étude, une base de données thématique organisée sous la forme d'un Système d'Information Géographique (SIG) a été développée pour cartographier les petites centrales hydroélectriques pour soutenir le Gouvernement dans le développement des sites potentiels.

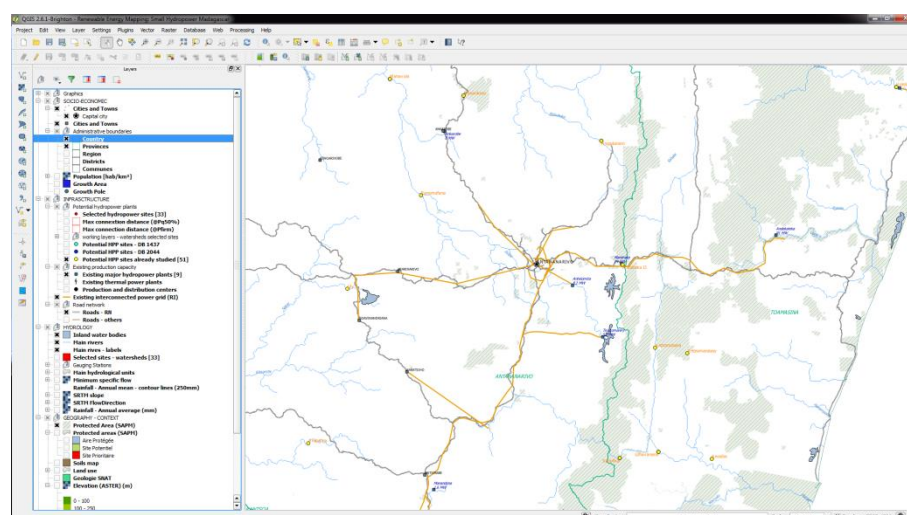
Le SIG un outil pour un développement du
potentiel hydroélectrique

6. Le SIG un outil pour un développement du potentiel hydroélectrique

BASE DE DONNÉES SIG

Tous les éléments relatifs au secteur de l'hydroélectricité à Madagascar possédant une référence géographique sont regroupés dans un système d'information géographique (SIG) dont le système de coordonnées de référence est GCS_WGS_1984 (Datum: D_WGS_1984 ; Prime Meridian: Greenwich ; Angular Unit: Degree).

Le système d'information géographique a été conçu pour rencontrer les conditions de compatibilité et de standardisation définies dans les termes de référence afin que les données géographiques puissent être publiées aisément sur la plateforme SIG de la Banque Mondiale. En outre, le consultant a utilisé le logiciel de Système d'Information Géographique *QuantumGIS*, libre d'accès, pour le traitement et la publication des données géographiques, ce qui permet sa diffusion et son transfert gratuit lors des formations qui ont été données à Antananarivo en 2015 et 2017.



La base de données contient les données spatiales vectorielles et matricielles. Cette base de données sera remise aux formats internationaux standards (ESRI shapefile et images geoTIFF). Un projet Quantum GIS a été créé afin de regrouper l'ensemble de ses données spatiales dans un Système d'Information Géographique (SIG) dont la symbologie est explicite et identique aux cartes produites dans l'Atlas Hydroélectrique de Madagascar. Ce dernier, présenté en Annexe D de cet Executive Summary, est un document qui contient toutes les informations directement ou indirectement liées à l'hydroélectricité à Madagascar. Une illustration indicative du SIG est présentée ci-dessus.

Un fichier Excel contenant les informations attributaires des couches a également été remis. Ce fichier contiendra l'ensemble des métadonnées relatives aux différents champs attributaires des couches.

De plus, les principaux éléments sont également disponibles au format KML (Keyhole Markup Language) utilisable dans le logiciel Google Earth afin de faciliter l'utilisation et la diffusion de l'information à un public moins spécialisé.

MAINTENANCE ET MISE À JOUR DE LA BASE DE DONNÉES GÉOGRAPHIQUE

Il est recommandé au Ministère de l'Energie de mettre en place le plus tôt possible des arrangements institutionnels pour la gestion, la maintenance et la mise à jour de la base de données géographique. Une cellule, logée au sein du Ministère, devrait être en charge de la base de données et interagir avec les organismes rattachés (JIRAMA, ORE, ADER) sur une base régulière pour centraliser puis diffuser l'information liée aux sites hydroélectriques existants et potentiels. La base de données devrait également inclure et actualiser les informations liées aux accords Ministère de l'énergie et des hydrocarbures-Promoteurs concernant le développement des sites hydroélectriques.

Le contenu de la base de données géographique est explicité dans le tableau ci-dessous.

Thématique	Format	Caractéristiques principales
Limite administrative: Pays	ESRI Shapefile	-
Limites administratives: Provinces	ESRI Shapefile	6 provinces
Limites administratives: Régions	ESRI Shapefile	22 régions
Limites administratives: Districts	ESRI Shapefile	110 districts
Limites administratives: Communes	ESRI Shapefile	1433 communes
Sites hydroélectriques existants	ESRI Shapefile	11 sites principaux
Centrales thermiques existantes	ESRI Shapefile	171 groupes thermiques principaux
Villes	ESRI Shapefile	32 villes principales
Sites du Système des Aires Protégées de Madagascar (SAPM)	ESRI Shapefile	Shapefile des sites du SAPM - Arrêté interministériel n°9874/2013 modifiant certaines dispositions de l'arrêté n°52005/2010 (version Avril 2011)
Modèle numérique de terrain (MNT)	GeoTiff	résolution spatiale de ~90m
Réseau routier	ESRI Shapefile	Routes nationales, routes principales et pistes principales
Réseaux électriques interconnectés (RI)	ESRI Shapefile	RIA (Réseau Interconnecté d'Antananarivo) - RIT (Réseau Interconnecté de Toamasina) - RIF (Réseau Interconnecté de Fianarantsoa)
Image satellite de Madagascar	GeoTiff	Image Landsat (2005)
Occupation du sol	ESRI Shapefile	8 classes d'occupation du sol: - Culture - Forêt - Fourree - Mangrove - Marécage - Plan d'eau - Savane - Zone reboisée
Sites hydroélectriques potentiels	ESRI Shapefile	33 sites hydroélectriques potentiels prometteurs dans la gamme de puissance ~1-20MW
Sites hydroélectriques potentiels	ESRI Shapefile	Sites hydroélectriques potentiels connus ou étudiés par le Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures et ses organismes rattachés
Sites hydroélectriques potentiels	ESRI Shapefile	Base de données brute des 403 sites hydroélectriques potentiels à Madagascar