



Synthesis

Climate change risks and adaptation options for Madagascar

*Sarah R. Weiskopf*¹, *Janet A. Cushing*¹, *Toni Lyn Morelli*² and *Bonnie J. E. Myers*³

ABSTRACT. Climate change poses an increasing threat to achieving development goals and is often considered in development plans and project designs. However, there have been challenges in the effective implementation of those plans, particularly in the sustained engagement of the communities to undertake adaptive actions, but also due to insufficient scientific information to inform management decisions. Madagascar is a country rich in natural capital and biodiversity but with high levels of poverty, food insecurity, population growth, and exploitation of natural resources. The country faces development and environmental challenges that may be intensified by climate change. The objective of this review is to provide a synthesis of the best-available information regarding climate change impacts on sectoral interests in Madagascar. To do this, we conducted a review of recent literature and conducted formal discussions with development agencies, non-government organizations (NGOs), and other stakeholders. Climate risks in Madagascar include increasing temperatures, reduced and more variable precipitation, more frequent droughts, more intense cyclones, and rising sea levels. We synthesized the observed and projected impacts of climate change on water resources, agriculture, human health, coastal ecosystems, fisheries, and terrestrial ecosystems and ecosystem services, and we discuss ongoing climate adaptation and mitigation activities. Because sectoral challenges and opportunities are linked, coordination among development organizations would be beneficial as they create new climate adaptation and mitigation initiatives.

RÉSUMÉ. Le changement climatique présente une menace croissante pour atteindre les objectifs de développement et est souvent pris en considération dans les plans de développement et les conceptions de projet. Toutefois, certains défis sont survenus dans la mise en oeuvre effective de ces plans, en particulier dans l'engagement durable des communautés à adopter des mesures d'adaptation, mais aussi en raison d'un manque d'information scientifique pour étayer les décisions de la direction. Malgré sa richesse en ressources naturelles et en biodiversité, Madagascar est un pays accablé par une grande pauvreté, l'insécurité alimentaire, une forte croissance démographique et l'exploitation de ses ressources naturelles. Le pays fait face à des défis en termes de développement et d'environnement qui pourraient être intensifiés par le changement climatique. Ce document a pour but de présenter une synthèse des meilleures informations disponibles concernant les impacts du changement climatique sur les intérêts sectoriels à Madagascar. Pour ce faire, nous avons réalisé une analyse des articles récemment publiés et organisé des entretiens formels avec des agences de développement, des organisations non-gouvernementales (ONG) et d'autres parties prenantes. Les risques climatiques à Madagascar comprennent une hausse des températures, des précipitations plus rares et plus variables, des sécheresses plus fréquentes, des cyclones plus intenses et l'élévation du niveau des océans. Nous avons synthétisé les impacts observés et prévus du changement climatique sur les ressources en eau, l'agriculture, la santé humaine, les écosystèmes côtiers, les pêcheries et les écosystèmes terrestres ainsi que sur les services des écosystèmes, et nous évoquons l'adaptation continue au climat et les mesures d'atténuation. Dans la mesure où les défis et les opportunités sectoriels sont liés, une bonne coordination entre les organismes de développement serait bénéfique, car elle permettrait de nouvelles adaptations au climat et des initiatives d'atténuation.

Key Words: *agriculture; climate change mitigation; coastal ecosystems; development; ecosystem services; fisheries; global change; health; terrestrial ecosystems; water resources*

INTRODUCTION

Climate change impacts on islands globally are severe and exacerbated by their unique geophysical characteristics (Nurse et al. 2014). Across islands, important sectors, including agriculture, water supply, fisheries, transportation, health, biodiversity, and livelihoods, are interconnected and highly vulnerable to the threats of increasing temperatures, sea-level rise, precipitation fluctuations, and changes in severity and frequency of extreme events (Nurse et al. 2014, Veron et al. 2019). Some islands, like Madagascar, have been isolated from the mainland for so long that they contain high numbers of endemic species, making them important contributors to biodiversity locally and globally (Myers et al. 2000, Kier et al. 2009). Habitat fragmentation and deforestation have influenced the natural resilience of island ecosystems to the impacts of climate change (Hannah et al. 2008).

Integration of climate adaptation into development plans is needed to reduce the multiple interacting effects of climate change across sectors (Nurse et al. 2014).

Madagascar is a prime example of the vulnerability of islands to climate change, with climate impacts permeating across multiple diverse sectors. Madagascar is a country particularly rich in natural capital, given its 90% endemic biodiversity (Rakotondravony et al. 2018). The island of Madagascar has lost much of its forested habitat, increasing the vulnerability of communities, biodiversity, and ecosystem services to climate change (Hannah et al. 2008). Chesney and Moran et al. (2016) developed a climate security vulnerability model to map climate change vulnerability and security concerns. Results suggested that Madagascar has moderate to low governance capabilities to

¹U.S. Geological Survey National Climate Adaptation Science Center, ²U.S. Geological Survey Northeast Climate Adaptation Science Center, ³Department of Applied Ecology, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina

address climate-related challenges, and overall is one of the southern African countries most vulnerable to the effects of climate change.

Demographically, Madagascar's population is growing rapidly, with an estimated annual growth of 2.39% per year (CIA 2020). The population is predominantly (61.1%) rural and the gross domestic product (GDP) per capita for 2017 was estimated at 1600\$USD (UNDP 2015, CIA 2020). Economically, approximately three-quarters of Madagascar's population lives below the national poverty line and faces an annual loss of 9-10% of the GDP due to environmental degradation (WHO 2016, Rakotondravony et al. 2018). Agriculture makes up 25% of the GDP and 80% of employment (CPGU and BNCCC 2017). There is very high food insecurity due to low agricultural productivity and incomes, recurring climate shocks, political instability, and household poverty (Harvey et al. 2014, Rakotondravony et al. 2018). Agricultural stressors vary regionally due to the variety of climatic conditions across the island. For example, drought is a significant issue in southern Madagascar, whereas flooding is more of a concern in the eastern part of the island, (Catholic Relief Services (CRS) and Adventist Development and Relief Agency (ADRA) interviews). Extreme weather events are a significant driver of persistent poverty, especially in rural areas (CPGU and BNCCC 2017).

In 2010, Madagascar adopted a national policy against climate change that aims to reinforce national resilience to climate change, reduce national vulnerability, and develop approaches for low carbon emissions (Cochrane et al. 2019). A national adaptation plan (NAP) is currently being prepared (CPGU and BNCCC 2017, Cochrane et al. 2019). To support the development and implementation of the NAP, a need exists to base conservation and adaptation decisions on climate change impacts on both human and biodiversity-related sectors (Hannah et al. 2008). A previous working group assessed potential impacts of climate change on Madagascar's ecosystems and human well-being and made recommendations including increased ecological protection and restoration, integrated coastal zone management, and agricultural intensification and diversification (Conservation International and WWF 2008). It is time for an updated assessment of the literature so that adaptation plans can reflect the current state of climate change science. To address this need, the primary objective of this work is to provide an updated synthesis of the best-available information regarding the documented and projected trends and impacts of climate change on specific sectors in Madagascar and to provide potential adaptation options. We focus specifically on adaptation (i.e., managing climate change effects) rather than mitigation (i.e., reducing emissions), although some actions (e.g., reducing deforestation) are important for both adaptation and mitigation. We review the literature and report on in-person and over-the-phone discussions with key stakeholders in the Malagasy government, key international development funding agencies, and local and international NGOs. The review and interviews covered country-level climate change impacts as well as effects on six key sectors: water resources, agriculture, human health, coastal ecosystems, fisheries, and terrestrial ecosystems and ecosystem services.

METHODS

Literature review

A literature review was conducted in January 2020 using Publish or Perish (Harzing 2007) to initiate searches in Google Scholar. Years were set 2014-2020 to capture the most recent literature. The following search strings were entered into the "keywords" field and returned the following number of peer-reviewed papers:

- Agriculture: "Madagascar" AND "agriculture" AND ("climate change" OR "global warming") AND ("temperature" OR "precipitation" OR "drought" OR "sea level rise" OR "cyclones" OR "extreme weather events").
- 996 results
- Biodiversity: "Madagascar" AND ("ecosystem" OR "biodiversity" OR "forest") AND ("climate change" OR "global warming") AND ("temperature" OR "precipitation" OR "drought" OR "sea level rise" OR "cyclones" OR "extreme weather events").
- 550 results
- Human health: "Madagascar" AND ("health" OR "disease") AND ("climate change" OR "global warming") AND ("temperature" OR "precipitation" OR "drought" OR "sea level rise" OR "cyclones" OR "extreme weather events").
- 986 results
- Coastal: "Madagascar" AND ("coastal" OR "sea level rise" OR "storm event") AND ("climate change" OR "global warming").
- 940 results
- Water resources: "Madagascar" AND ("water resources" OR "water availability" OR "water supply") AND ("climate change" OR "global warming" OR "drought").
- 999 results
- Fisheries: "Madagascar" AND ("fish" OR "fisheries" OR "aquaculture") AND ("climate change" OR "global warming") AND ("temperature" OR "precipitation" OR "drought" OR "sea level rise" OR "cyclones" OR "extreme weather events").
- 1000 results

We conducted a systematic review of the top 100 most relevant and top 50 most cited papers. We first read through article titles and abstracts and excluded papers that were not related to climate change impacts or management strategies in the region. We conducted full text reviews of all papers with relevant titles and abstracts (106 papers).

Our initial literature search was conducted in English, which may have caused us to miss relevant research published in French, Malagasy, or another language. However, in addition to our formal literature search, we also reviewed reports and project overview documents that were opportunistically sent to us by stakeholder groups, including a review in French of recent

literature on climate change in Madagascar (Rakotondravony et al. 2018). This resulted in an additional 19 documents included in the review.

Stakeholder discussions

In addition to the literature search, the project team spent three weeks in Madagascar in February-March 2020 conducting formal discussions with stakeholders (see Appendix 1 for list of interviewees). During these meetings, we discussed climate change impacts on sectors of interest, current climate change adaptation activities, and information gaps. Appendix 2 includes a list of questions that were sent to stakeholders ahead of time to guide the discussion. The team also conducted several visits to sites of ongoing adaptation projects.

Synthesis

We qualitatively synthesized information on climate change impacts in Madagascar obtained from the literature review. We discuss overall trends and provide relevant examples, noting areas of uncertainty in which observations and projections are unclear or do not agree. Where relevant, we used information from stakeholder discussions to supplement our literature review, mostly to provide examples of ongoing adaptation activities or challenges. Throughout the text, we cite information obtained from the interviews as “(organization name interview).”

RESULTS

Current climate and climate change in Madagascar

Madagascar's climate varies greatly across the island (Tadross et al. 2008, Rakotoarison et al. 2018, Raholijao et al. 2019). On the east coast, the climate is hot and humid, and rainfall varies from 1100-3700 mm per year. Most rain occurs from January to April, and the average annual temperature is between 23°-26°C. On the west coast, the climate is tropical with a hot, dry summer. Annual rainfall decreases from 1500 to 400 mm per year from north to south across the west coast. The dry season lasts from April to October, and the annual average temperature varies between 24°-27°C. The southwest part of the island is semi-arid, and annual rainfall is about 500-700 mm per year. In the central highlands, there is significant interannual variation in temperature (16°-22°C) and precipitation (900-1500 mm; Rakotondravony et al. 2018). The north and northwest region has a tropical climate with monsoon conditions driving rainfall in the summer (Rakotoarison et al. 2018, Raholijao et al. 2019).

Temperature trends

Observed air and coastal water temperatures have been increasing across Madagascar (Niang et al. 2015, Cochrane et al. 2019, Raholijao et al. 2019). Maximum air temperatures increased at a rate of 0.23°C per decade, and sea surface temperatures in the western Indian ocean increased by 0.60°C between 1950 and 2009 (Raholijao et al. 2019). Mean, maximum, and annual temperatures are projected to increase under all greenhouse gas emission scenarios (Rakotondravony et al. 2018). Under a high emissions scenario (representative concentration pathways, i.e., RCP 8.5), mean annual temperature is projected to rise by 4.1°C by 2100 (WHO 2016), which is higher than previous estimates (Tadross et al. 2008). Under a scenario in which emissions are greatly reduced and even reversed (RCP 2.6), warming could be limited to 1.1°C (WHO 2016).

There has been a warming trend in the ocean since at least 2005 (IPCC 2019). By 2100, the ocean is very likely to warm by two to four times more under RCP 2.6 and five to seven times more under RCP 8.5 compared with the observed changes since 1970 (IPCC 2019).

Precipitation trends

Annual rainfall has decreased across most weather stations in Madagascar, although this trend is weak compared to interannual variability (Raholijao et al. 2019). In the western part of the island, precipitation has become more intense (Rakotondravony et al. 2018), and more extreme precipitation is expected in parts of the island (Chesney and Moran 2016). More dry days are projected as well. Under a high emissions scenario, the longest dry spell is projected to increase by about 20 days on average by 2100 (WHO 2016). Local weather trends can also be impacted by deforestation and land-use change (Ghulam 2014).

Sea-level rise

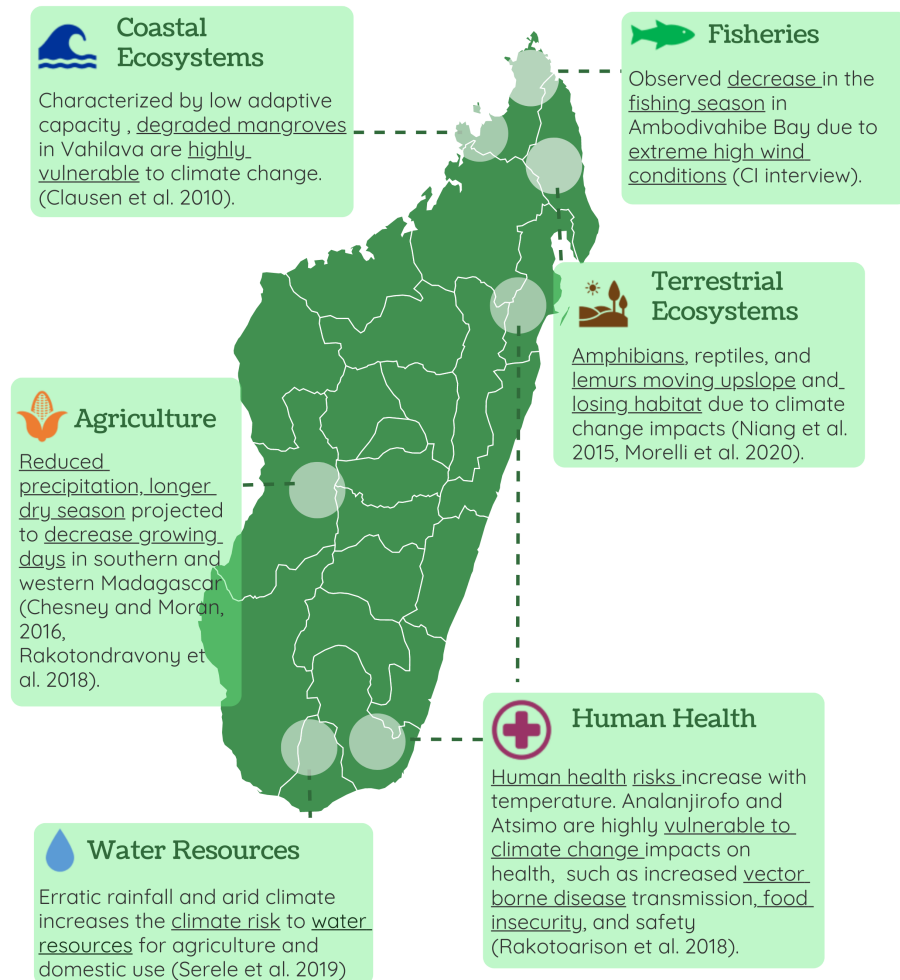
Sea-level rise (SLR) in Madagascar has been 1.57 mm/year between 1993 and 2017 (Raholijao et al. 2019). Global SLR is projected to be higher by the end of this century under all scenarios, including those compatible with achieving the long-term temperature goal set out in the Paris Agreement (IPCC 2019). There is medium confidence that the global mean sea level (GMSL) will rise between 0.43 m (0.29-0.59 m; RCP 2.6) and 0.84 m (0.61-1.10 m; RCP 8.5) by 2100 relative to 1986-2005. Relative SLR depends on a variety of factors. Differences from the global mean can be greater than ±30% in areas of rapid vertical land movements, including those caused by local anthropogenic factors such as groundwater extraction. Global mean sea level, in combination with tides, storm surge, and extreme waves, have an impact on coastal communities. These extreme events are likely to become more frequent in the future (Oppenheimer et al. 2019).

Cyclones and drought

Madagascar has the highest risk of cyclones in Africa; it currently experiences three to four cyclones per year between November and April (Rakotoarison et al. 2018). The eastern, northeastern, and western regions are most affected by cyclones (Mavume et al. 2010). Similar to earlier findings (Tadross et al. 2008), cyclone intensity is expected to increase in the future (Delille 2011, CPGU and BNCCC 2017, Rakotoarison et al. 2018), whereas the frequency of tropical cyclones making landfall over Madagascar is projected to decrease in 1°, 2°, and 3°C warmer scenarios (Malherbe et al. 2013, Muthige et al. 2018). There has also been a southerly shift in location of cyclone landfalls, which is expected to continue (Fitchett and Grab 2014, Cattiaux et al. 2020). The projected future of a more violent and unpredictable cyclone season could make adaptation by local communities more difficult and destruction of livelihoods and lives more likely (Shultz et al. 2005, Hsiang and Jina 2014).

Droughts are most common in southern Madagascar but can also occur in the central highlands and eastern region (CPGU and BNCCC 2017, Rakotoarison et al. 2018). Droughts have become more common in the southern part of the island (WHO 2016) and have increased slightly in northern Madagascar from 1951-2010 (Spinoni et al. 2014). Evapotranspiration increased significantly at some weather stations between 1980 and 2010 which, combined with reduced rainfall, could lead to increased drought conditions (Djaman et al. 2018). Deforestation and poor

Fig. 1. Specific examples of observed and projected climate change risk to water resources, agriculture, human health, coastal ecosystems, fisheries, and terrestrial ecosystems sectors in Madagascar.



land-use practices have exacerbated damage caused by floods (Rakotondravony et al. 2018).

Climate change impacts to development agency focus areas in Madagascar

We provide an overview of climate change effects to water resources, agriculture, human health, coastal ecosystems, fisheries, and terrestrial ecosystems in Madagascar. For each sector, we review the observed and projected climate change effects and discuss ongoing or potential adaptation options. Specific examples from the six sectors are presented in Figure 1.

Water resources

Currently, Madagascar is experiencing one of the worst water crises in the world, with numerous challenges associated with water management infrastructure (Rakotondravony et al. 2018,

Serele et al. 2019). Only 27% of households have drinking water on site, and 45% of people use unimproved or surface water for drinking (WHO and UNICEF 2017). About 45% of people practice open defecation (WHO and UNICEF 2017). In 2018, an estimated 66% of rural populations and 49% in urban areas were deprived of drinking water (Serele et al. 2019).

In general, the water and sanitation sectors are characterized by poor water management. Numerous inadequacies exist regarding flood risk reduction, pollution exposure, behavior of the general population, budget allocations, and regulatory enforcement. Sanitation facilities are restricted to the perimeters of city centers; many have exceeded their project life and need repair. Many households do not have the infrastructure needed to dispose of waste, including excrement; tens of thousands of cubic meters of waste are poured into the urban network without treatment.

Along with poor water quality, this results in water-based diseases that are the main causes of sickness and death. Other natural and anthropogenic pressures such as deforestation, erosion, and saltwater intrusion exacerbate these problems (García-Ruiz et al. 2017, Rakotondravony et al. 2018). Erosion and resulting excessive sedimentation can damage bridges, irrigation ditches, and reservoirs, leading to enormous infrastructure maintenance costs (García-Ruiz et al. 2017).

Because most of the population relies mainly on surface water, the water supply depends heavily on the rainfall regime and is sensitive to any disturbance of the climate, including projected decreases in annual rainfall and increased evapotranspiration. In addition, SLR might increase saltwater intrusion of the groundwater along parts of the coast. These changes are likely to worsen water availability (Rakotondravony et al. 2018). In the region of Antananarivo, surface water might no longer be able to meet water demands by 2025, let alone 2050 or 2100 (Rakotondravony et al. 2018).

Southern Madagascar generally has erratic rainfall and an arid climate, with very poor access to water for domestic and agricultural consumption, making it among the most water-stressed areas of the country ((Serele et al. 2019; Fig. 1). During the dry season, groundwater (the predominant source of water in southwestern Madagascar) becomes even more limited, resulting in extremely poor hygiene practices and very high pressure on functioning water points. Fifty percent of people living in southern Madagascar, about 1.5 million people, required humanitarian assistance in 2020 (WFP 2020). Groundwater recharge is strongly influenced by rainfall pattern and, in some cases, is highly dependent on rainfall from extreme events (i.e., cyclones and tropical storms; Carrière et al. 2021).

On the ground climate adaptation activities and other opportunities:

Possible climate adaptation strategies can include organization and sustainable management of water infrastructure, with improved access to potable water (Rakotondravony et al. 2018). Several organizations are working to improve rainwater collection or investing in local water points to provide access at the community level. Providing water at the local level may be more effective given the current governance challenges associated with managing larger pipelines (ADRA interview). The United States Agency for International Development (USAID) is working to improve water, sanitation, and hygiene (WASH) governance, develop public private partnerships to improve water availability and sanitation, and promote messaging and sensitization on key sanitation and hygiene behaviors (USAID WASH interview). Developing integrated water resources management for watersheds, including water supply, flooding, and drought would also be beneficial, although addressing immediate needs has taken priority (USAID WASH interview).

Agriculture

About 62% of the population in Madagascar is rural and mainly dependent on subsistence farming for food security and household income (CIA 2020). Low land availability and limited investment capacity have led much of this population to maintain traditional slash and burn agricultural practices with low use of agricultural inputs, limited soil conservation practices, and poor use of hydro-agricultural infrastructure (Delille 2011, Harvey et

al. 2014, Desbureaux and Damania 2018, Llopis 2018, Rakotondravony et al. 2018). Many farmers have low productivity plots of essential food crops such as rice, cassava, corn, and sweet potato (Rakotondravony et al. 2018), and most do not produce enough rice (a staple food for most Malagasy) to feed their household for the year (Harvey et al. 2014). Anthropogenic pressures from farming such as deforestation and silting have been degrading natural resources, including soil, water, and biodiversity (García-Ruiz et al. 2017, Rakotondravony et al. 2018). Smallholder farmers are particularly vulnerable to climate shocks due to dependence on rainfed agriculture, limited land area for growing crops, high poverty, food insecurity, and lack of information and resources to prepare for and cope with extreme events (Harvey et al. 2014, Rakotobe et al. 2016).

Crops may respond positively to elevated CO₂ concentrations, but increasing variability of rainfall, more intense cyclones, and increasing temperatures can reduce agricultural production (Lal et al. 2015). Too much rainfall can lead to crop diseases, whereas too little rainfall can be a disaster for rainfed crops (Amusan and Odimegwu 2015). For example, maize production is projected to decrease over large parts of Madagascar due to reduced precipitation (Shi and Tao 2014, Ngwakwe 2019). Reduced precipitation and a longer dry season are projected to decrease the growing season by up to 50 days by 2100, especially in southern and western Madagascar (Chesney and Moran 2016, Rakotondravony et al. 2018). Farmers in some areas have already reported a shortening of the rainy season (Delille 2011). Droughts can also lead to outbreaks of migratory locusts that can extend over large areas and destroy entire fields, although this is also impacted by locust control measures (Gay-des-Combes et al. 2017). Madagascar is projected to become more suitable for cassava pests as well (Niang et al. 2015).

Cyclones can destroy crops; associated flooding, especially in areas with high deforestation, can leave behind a layer of sand that ruins plots for cultivation (Llopis 2018). Heavy rainfall, including rainfall associated with cyclones, intensifies depletion of soil nutrients associated with slash-and-burn agriculture, especially if farmers are not using cover crops (Gay-des-Combes et al. 2017).

After agriculture, livestock production is the second most common livelihood in Madagascar (Rakotondravony et al. 2018). Livestock are used for food and as a source of savings. Although there is only limited evidence to date for climate change impacts on livestock production, projected changes in temperature and rainfall amount and distribution could have direct and indirect impacts on livestock (Thornton et al. 2015). Above 30°C, livestock often reduce their food intake. Changes in rainfall could reduce forage quality and quantity and lower the carrying capacity of rangelands. Interactions with other stressors such as rangeland degradation, variability in water access, and fragmentation of grazing areas could compound climate driven impacts (Niang et al. 2015).

On the ground climate adaptation activities and other opportunities:

Diversification of livelihoods and species:

To deal with changing conditions, farmers might adapt by diversifying their livelihoods, either through growing secondary crops, livestock farming, or other activities such as fishing, crafts,

or labor (Delille 2011). Using crop cultivars and livestock breeds that are resilient to drought, pests, salinity, weeds, and/or flooding might also be an effective approach (Thornton et al. 2015, Zougmore et al. 2018). For example, recent drought-resistant and short-cycle varieties of rice or maize have allowed some farmers to grow an extra season of crops (Delille 2011). Despite the promise of new crop varieties, unexpected challenges may arise in implementation, such as unintended use of seeds, e.g., eating the seeds directly (United Nations Development Programme (UNDP) interview).

Changing agricultural practices and infrastructure:

Altering crop planting calendars can increase yields, and farmers in Madagascar have already reported managing planting schedules to avoid hazard-prone times (Delille 2011, Dawson 2016, Kruger 2016). In some areas, shifting the timing of planting may not be effective because rainfall is more erratic and prone to droughts in the middle of the season (Groupement Semis Direct Madagascar (GSDM) interview). Establishing early-warning systems that provide information on the timing, length, and amount of rainfall would be helpful for farmers in determining planting schedules and crops (Asafu-Adjaye 2014). The German development agency Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) has started a hotline that provides a readout of agricultural calendars for peanuts, onion, rice, corn, and ginger based on the caller's location (GIZ interview).

Improving water infrastructure and promoting small to medium-scale irrigation could help farmers deal with variable rainfall (Asafu-Adjaye 2014). Improving soil and water conservation strategies could also be an effective approach (Dawson 2016, Desbureaux and Damania 2018, Zougmore et al. 2018). Modernizing production infrastructure, intensifying production, and providing training and technical assistance to promote adoption of new techniques or technologies could also help farmers adapt (Asafu-Adjaye 2014, Rakotondravony et al. 2018).

Using fertilization methods that increase soil organic matter content, protecting against erosion (e.g., through reforestation or cover plants), or use of mulching or composting could help with the reduction of soil nutrients (Delille 2011, Gay-des-Combes et al. 2017). Other adaptation options include the use of agroforestry and implementing agricultural insurance to help manage climate-related shocks (Zougmore et al. 2018).

Climate-smart agriculture:

Two major potential climate-smart agricultural practices, which may be effective when crops are primarily limited by soil moisture, are conservation agriculture (CA) and the system of rice intensification (SRI; Corbeels et al. 2014, Lima 2014, Penot et al. 2018). Conservation agriculture involves maintaining soil coverage and rotating crops, and in some cases, using no-till agricultural practices; this has improved soil quality and increased resilience to weather events, including erratic rainfall (Kirindy Village interview). Maintaining crop residues using CA may also be an effective adaptation technique for livestock (Thornton et al. 2015). System of rice intensification uses techniques to improve soil, water, and nutrient conditions to increase yields without increasing costs (Lima 2014). System of rice intensification can increase rice yields by 25-100% and decrease water use by 25-50%.

Farmers report that SRI crops are more resilient to water and temperature stress and heavy wind and rain from storms (Andrea Mboyerwa 2018).

Access to markets:

One challenge for farmers can be finding buyers for their products, especially because middlemen may pay low prices for crops (Kirindy Village interview). Identifying and removing non-climate barriers for farmers to enter the market may make it easier for farmers to adapt (GIZ interview). Several organizations (e.g., GIZ, Conservation International (CI), USAID, Prosperer) are promoting crop value chains and market access. For example, the Prosperer program under the Madagascar Ministry of Agriculture, Livestock, and Fisheries is supporting rural micro-enterprises to create links between rural producers and private sector operators (Prosperer interview).

Human health

Lack of adequate health care and disease prevention, malnutrition, and poverty predisposes many people in Madagascar to climate change effects. Most of the population lacks access to adequate health services; for example, 40% of the rural population is more than five kilometers from a health facility and lacks a means of transportation, and bad weather can make it even more difficult to deliver health care in isolated areas. If roads become impassible after weather events, it can limit medicine supply in health centers (Morondava Centre de Santé de Base (CSB2) interview). Many health facilities also lack sufficient human resources and equipment, in some cases including electricity and running water (Morondava CSB2 interview). Natural disasters can cause significant damage to the health sector each year, and impacts continue long after the event. In general, the country lacks resources to adequately prepare for, respond to, and recover from damage caused by extreme events (Rakotoarison et al. 2018).

Diseases are the leading cause of morbidity and mortality in Madagascar; many are sensitive to climatic conditions (Rakotoarison et al. 2018). Accessibility of sanitation and water supply is low, as is awareness among rural populations of the risks of communicable, diarrheal, and acute respiratory diseases. Outbreaks of communicable diseases often occur after extreme climatic events, and water-borne diseases are becoming more frequent as waterways are contaminated after more frequent and intense floods (CPGU and BNCCC 2017, Rakotondravony et al. 2018).

Climate changes can directly impact health in Madagascar. Increasing extreme events can reduce quality of life, especially for those without adequate housing (Davis-Reddy and Vincent 2017). Increasing temperatures and heat waves could increase heat-related mortality, especially for the elderly, young children, the chronically ill, and the poor. Under a high emissions scenario, heat-related deaths among those 65 years and older are projected to increase to 50 deaths/100,000 by 2080 compared to the average of 1 death/100,000 between 1961 and 1990 (WHO 2016). Additionally, high temperatures can decrease the effectiveness of certain medications and vaccines such as vitamin A and tests for malaria if they are not stored in refrigerators, which can be a challenge for health centers without electricity (Morondava CSB2 interview). High temperatures and drought can also lead to water shortages.

Sea-level rise and flooding are additional concerns. Currently, 27% of people live below 100 m in elevation (Davis-Reddy and Vincent 2017). Without large investments in adaptation, over 570,000 people are projected to be impacted by SLR between 2070 and 2100 under a high emissions scenario (WHO 2016). Inland river flooding risk is also projected to increase (WHO 2016).

Disease:

Reduced agricultural productivity and extreme events could increase food insecurity. For example, extreme events can reduce agricultural output and interrupt food supply chains (Rakotoarison et al. 2018). Without considerable adaptation efforts, the risk of hunger and malnutrition could increase by 20% by 2050 (WHO 2016); this malnutrition can have lifelong consequences for development and health (Davis-Reddy and Vincent 2017). Moreover, undernourished people are more likely to get sick (Morondava site visit).

Temperature, precipitation, and humidity can influence disease spread by altering life cycles and range of disease vectors and by influencing transmission of water and food-borne diseases (WHO 2016). The projected increase in temperature in Madagascar is likely to increase transmission of climate-sensitive vector borne diseases such as malaria, dengue, chikungunya, and yellow fever in many areas (Rakotoarison et al. 2018; Fig. 1). The distribution of the mosquito vectors for West Nile virus and lymphatic filariasis are also projected to increase (Samy et al. 2016). Acute respiratory infections, diarrheal diseases, malnutrition, and malaria (all among the top 10 causes of morbidity in outpatient clinics in Basic Health Centers) are projected to increase in many areas.

Malaria:

The number of malaria cases and deaths in Madagascar has risen in recent years, due in part to a reduced budget for malaria control and deterioration of overall health after the 2009 coup. Future climate change may facilitate both the expansion of malaria's mosquito vectors to areas in which they do not currently exist and more favorable temperature conditions for transmission in highland areas (Caminade et al. 2014, Ryan et al. 2015, Rakotoarison et al. 2018). Under a high-emissions warming scenario, 46 million people in Madagascar are estimated to be at risk for malaria by 2070. Although this is driven in part by population growth, a low-emissions scenario reduces the number of people at risk by about 5 million (WHO 2016).

Plague:

Madagascar has one-third of the reported cases of plague worldwide; it occurs regularly in highland areas above 800 m (Kreppel et al. 2014, 2016). Plague is caused by the bacteria *Yersinia pestis*, which is transmitted primarily between invasive rodent hosts by fleas. Humans can become infected when they come into contact with the fleas or infected animal tissue (Kreppel et al. 2014). Most plague cases occur during the warm, wet season from September to March. Warmer temperatures can influence the development rate of both the bacteria and the fleas, and warmer temperatures and higher rainfall have been associated with increased plague events in Madagascar (Kreppel et al. 2014). However, because plague is found mostly in cool, highland areas and absent from warm, low lying regions, climate change may

decrease plague incidences as these areas become too warm (Kreppel et al. 2016).

On the ground climate adaptation activities and other opportunities:

Four regions (Atsimo-Atsinanana, Androy, Anosy, and Analanjirifo) were found to be highly vulnerable to climate change impacts on health (Rakotoarison et al. 2018; Fig. 1). Adaptation measures could include integrating risk management into health system activities (e.g., increasing disaster response capacity) and strengthening community resilience (e.g., by increasing capacity for basic health services). For example, NGOs Impact, Mahefa Miaraka, and Access are working to improve access to basic health services such as malaria treatment, family planning, and mother and child health in Menabe (Morondava Health Center CSB2 interview). Because some villages are far from health centers, community agents can provide a basic level of care in communities and are trained to treat diarrhea, malaria, respiratory illness, and family planning (Morondava site visit). Reducing vulnerability at the household level, including improving the standard of living, access to health-care infrastructure, and increasing education/literacy, is an important adaptation measure (Rakotoarison et al. 2018). For diseases such as malaria, increasing control efforts and increasing awareness of the disease may be effective (Rakotondravony et al. 2018).

Coastal ecosystems

Madagascar has the highest level of coral biodiversity in the Indian Ocean, contains Africa's fourth largest extent of mangroves, and is home to 8 of the world's 60 seagrass species. Numerous non-climate stressors reduce the resiliency of these systems to climate change. Climate change will also have indirect effects on this ecosystem; for example, populations of migratory marine mammals from the Indian Ocean are likely to be affected by climate change during their feeding season in the polar regions (Rakotondravony et al. 2018). Nematchoua et al. (2018) reported observations of decreased marine species (mollusks, crustaceans) in seasonal activities and migration. These effects, along with other drivers, i.e., insufficient surveillance and maritime and coastal protection; siltation, coastal accretion; urbanization; population growth; poverty; poor governance structures; political instability; and lack of ecologically friendly economic incentives, result in high vulnerability for the coastal and near-shore marine ecosystem (Rakotondravony et al. 2018, Cochrane et al. 2019). Moreover, SLR is likely to have drastic impacts; part of the coastal areas of Morondava and Mahajanga, in the northeast of Madagascar, might be submerged by 2100 because of SLR (Rakotondravony et al. 2018).

Mangroves:

Mangroves provide important ecosystem services such as protection from natural disasters, including wave attenuation during storms and provision of fuelwood and building materials. The heavy reliance on mangrove ecosystems is leading to increasing and wide-spread degradation and deforestation throughout Madagascar, with an estimated net loss of 21% between 1990 and 2010 (Rakotondrazafy et al. 2014, Benson et al. 2017, Garcia-Ruiz et al. 2017, Rakotondravony et al. 2018). Studies indicate that by 2100, climate hazards alone may reduce mangrove coverage by 15%. Intense cyclones can completely

destroy mangroves and affect neighboring areas that are no longer able to maintain viable shrimp and crab populations, thus forcing fishermen to sail farther to fish (Rakotondravony et al. 2018). In interviews conducted in fishing villages, Lemahieu et al. (2018) reported an observed decrease in marine and mangrove resources over a 20-year period.

Exposure among Madagascar's mangroves varies depending on the probability of future inundation in that location, and individual species vary in their sensitivity to an increase in salinity, flooding, drying, and siltation. Mangrove regions that have high exposure to SLR and/or silting from upland sources and low regeneration rates are more vulnerable than those with low exposure and moderate to high regeneration rates (Clausen et al. 2010). Healthy mangroves, such as those found in Andranomavo, are less vulnerable because of the availability of potential migration area and the high rate of regeneration. However, degraded mangroves, like those found in Vahilava, have a high vulnerability to climate change and a lower adaptive capacity, with an almost zero regeneration rate (Fig. 1). About 70% of the mangroves in the Tsiribihina delta have moderate to high vulnerability whereas only about 20% of mangroves in the Manambolo delta have moderate to high vulnerability (Clausen et al. 2010).

Coral reefs:

Coral reefs are highly vulnerable because of fishing pressure and population growth, as well as increasing pollution and excessive sedimentation from upland sources (Rakotondrazafy et al. 2014, García-Ruiz et al. 2017, Rakotondravony et al. 2018). In addition to these non-climate stressors, coral reefs are highly vulnerable to climate change due to ocean acidification and ocean warming; a combination of these impacts is causing bleaching around Madagascar (IPCC 2019). Erosion of the coast and destruction of coral reefs due to increased cyclone activity are serious threats to the livelihood activities for many fishing communities (Rakotondravony et al. 2018). According to the IPCC (2019), almost all coral reefs will degrade from their current state, even if global warming remains below 2°C, and the remaining shallow coral reef communities will differ in species composition and diversity from present reefs. Bleaching episodes are likely to multiply, with the possibility of complete disappearance of corals in the Indian Ocean within 20-50 years. Cascading effects of coral reef degradation include the decline of fish populations and eventual erosion of beaches. Beach degradation will affect populations of sea turtles, which are already threatened by rising temperatures due to the influence of temperature on the sex of the turtles during egg incubation (Rakotondravony et al. 2018). Declines in coral reef health will greatly diminish the services they provide to society, such as food provision, coastal protection, and tourism (IPCC 2019).

Seagrasses:

Cyclones can adversely affect seagrass beds (Côté-Laurin et al. 2017). Cyclone Haruna decreased total seagrass coverage by an average of 15.3% to 36.3% through uprooting, breaking, and smothering because of burial and reduced light penetration from suspended sediments. That said, the reduction in seagrass cover that provides food, shelter, and protection for fishes did not appear to significantly affect fish assemblages in the short term.

Seagrass species varied in their resilience to cyclones. Three species at Antsaragnaso (*Cymodocea rotundata*, *Halophila ovalis*, and *Halodule uninervis*) increased slightly after the cyclone. *C. rotundata* and *Thalassodendron ciliatum* had a high resilience and tolerance (Côté-Laurin et al. 2017).

On the ground climate adaptation activities and other opportunities:

Possible adaptation measures to adapt to climate change include coastal land acquisition by local authorities, rehabilitation of sectors degraded by deflation, reprofiling of the coast, and windbreak installation (Rakotondravony et al. 2018). For example, windbreaks such as planting dry-resistant Filaos, can provide biological stabilization of dunes. Education and awareness raising can also increase the success of conservation activities (D'agata et al. 2020). Some adaptation is already occurring. Nosy Hara Marine Protected Area is the first protected area in the country to incorporate climate change into its management, including capacity building, conducting a vulnerability assessment, and prioritizing management actions (Rakotondrazafy et al. 2014).

Mangroves:

Mangrove restoration may be an effective adaptation strategy. For example, Community Centered Conservation (C3) is working on mangrove restoration, including capacity building to support mangrove restoration and management activities. Community Centered Conservation also trains "conservation ambassadors" in the community and environmental education programs in primary and secondary schools (C3 interview). Recently, C3 has moved to using tree nurseries rather than direct planting so that trees are large enough to withstand strong storms when they are planted. However, more information is needed about ideal conditions and timing for restoration activities. Identifying salt-tolerant mangrove species that are more likely to survive as sea levels rise and water becomes more saline may also be an effective approach (United States Forestry Service (USFS) interview).

Coral reefs:

The widespread decline in warm-water corals has led to alternative restoration approaches to enhance climate resilience, such as "coral reef gardening," and research on assisted evolution, colonization, and chimerism for reef restoration (IPCC 2019). Assisted evolution uses gene manipulation to enhance resilience to climate change and other human impacts, whereas assisted colonization involves moving species outside their historical ranges to mitigate loss of biodiversity or in anticipation of climate-induced habitat changes. Coral chimerism occurs when a coral has cells that originate from at least two sexually-born individuals of the same species and is a natural tissue transplantation or fusion (Rinkevich 2019). However, the effectiveness of these approaches to increase resilience to climate stressors is uncertain given the current trend in greenhouse gas emissions (IPCC 2019).

Fisheries

Marine and freshwater fisheries provide valuable services to communities in Madagascar (Benstead et al. 2003, Cochrane et al. 2019). Marine fisheries, including shrimp, octopus, and coral reef fishes, enhance coastal communities by supporting

livelihoods through nutrition and income generation (Cochrane et al. 2019). For example, marine fisheries in the Atsinanana Region provide a primary source of protein and income for the coastal population and traditional fishermen and generate approximately €125.7 million per year (Rakotondravony et al. 2018). Freshwater fisheries are also important in certain regions in Madagascar. Lake Alaotra contains the largest inland fishery in Madagascar with inland fisheries activities making up one of two main sources of income (Lammers et al. 2015). Additionally, many of the native freshwater fish populations are highly endemic to Madagascar and contribute to a global hotspot of freshwater diversity (Benstead et al. 2003). Freshwater fish in Madagascar include many basal taxa, which are of conservation importance because some provide the only evidence of evolution in related groups (Benstead et al. 2003).

Climate risks for marine and freshwater fisheries include ocean acidification, changes in cyclone events, SLR, increasing temperatures, wind intensification, increased occurrence of extreme weather events, and the facilitated spread of exotic species (Rakotondravony et al. 2018, Cochrane et al. 2019). Fisheries may also face other indirect climate change threats; for example, changes in rainfall could lead to a crop failure, which could lead to an increase in fishing activities and overfishing (World Wide Fund for Nature (WWF) interview). These threats impact fisheries production, marine and freshwater biodiversity, fish growth, reproduction and survival, and endemic species conservation (Bamford et al. 2017, IPCC 2019). Coupled with other anthropogenic stressors (such as exotic species introductions, wetland destruction, marsh clearing, deforestation, overfishing, and siltation from soil erosion), marine and freshwater fisheries and habitats are vulnerable and in need of conservation and management attention (Benstead et al. 2003, Bamford et al. 2017).

Climate impacts to coral reefs in Madagascar have cascading effects on marine fisheries populations and the marine fisheries sector production (Cinner et al. 2012). However, some marine fisheries, such as the octopus fishery, may be resilient to the impacts of climate change (Cochrane et al. 2019). Inland fisheries production in wetlands, native freshwater fish endemism, and taxonomic importance are the major management and conservation concerns for the Madagascar freshwater fisheries sector in a changing climate (Benstead et al. 2003, Lammers et al. 2015). Changes in precipitation and forest cover impact freshwater fish habitat and determine whether flow will be available year round or dry up during certain seasons (Benstead et al. 2003). Changes in El Niño patterns, precipitation, and extreme drought and cyclone events from climate change have an impact on streamflow in island regions with impacts to freshwater fisheries.

In marine and coastal fisheries, socioeconomic interactions play an important role in how climate change may impact fishing communities. Extreme or unpredictable weather events reduce fishing activities for shrimp and crab because fishers are less likely to engage in capturing them during dangerous conditions or may switch from shrimp to crab capture, depending on conditions (Cochrane et al. 2019). Some fishers do not have radios and have no way to get warnings about extreme weather events ahead of time, which is a human safety risk (UNDP interview). More

intense and persistent prevailing wind patterns could alter fishing capacity and lead to an increase in fishing in coral reefs and mangrove channels, leading to overfishing and habitat destruction (WWF interview). In Ambodivahibe, fishermen have reported that the length of the fishing season has been reduced by three months because of strong wind conditions (CI interview; Fig. 1). Villagers in Lovobe also reported that some species are no longer found, that fishing yields have declined, and that they have to travel farther to catch fish, but it is unclear whether this is due to overfishing, loss of mangroves, or climate change (Lovobe interview).

On the ground climate adaptation activities and other opportunities:

Activities described in the coastal section, such as mangrove and coastal reef restoration, are important adaptation strategies for fisheries. Additional strategies include promoting alternative livelihoods and establishing value chains. Access to markets, presence of middlemen in villages, and higher education levels can increase the adaptive capacity of fishing communities (D'agata et al. 2020). In Ambodivahibe, Conservation International is promoting alternative livelihoods such as goat farming and beekeeping. They are also working on restoring mangroves and planting trees near villages to protect them from cyclones (CI interview). In the South, UNDP is working to establish value chains by connecting fishermen with buyers (UNDP interview).

Terrestrial ecosystems and ecosystem services

About 90% of species in Madagascar are endemic, and many are threatened with extinction due to habitat loss and fragmentation, agricultural expansion, invasive species, overharvesting, and climate change (Ganzhorn et al. 2001, Vieites et al. 2009, IUCN 2018). For over a century, deforestation has been a main threat to biodiversity; 44% of natural forest cover was lost between 1953 and 2014 (Rakotondravony et al. 2018, Vieilledent et al. 2018), mostly due to slash-and-burn agriculture for subsistence farming and charcoal production as well as illegal removal of valuable timber such as rosewood (Waeber et al. 2015). If these rates continue, habitat loss will threaten the persistence many endemic species (Morelli et al. 2020).

Despite an impressive quadrupling in size of Madagascar's protected area extent since 2003 (Kremen et al. 2008), significant problems remain and in some cases are increasing, including lack of effective management, incentives for local communities to participate in management, stable financing, law enforcement, and science-based resource management (Gardner et al. 2018).

Studies have shown over 100 Malagasy species that are vulnerable to climate change (Pacifci et al. 2015). Busch et al. (2012) predicted that many species will shift their ranges south or upslope to follow changing climate conditions or experience range reductions. Eastern humid forests are predicted to contract by 2080, whereas western dry forests may shift to the east (Rakotondravony et al. 2018). On Tsaratanana Massif, the highest mountain in Madagascar, reptiles and amphibians are moving upslope (Niang et al. 2015). A recent study modeled the future distributions of 57 species in Madagascar and projected that 27 species will have future distributions of <50% of their current range; 14 species will have distributions <20% of their range; and

6 species are projected to have distributions <1% of their current range, including 3 species projected to go extinct (Brown and Yoder 2015). Importantly, many of these species lack suitable habitat to connect their current habitat with future suitable habitat (Brown and Yoder 2015).

Changing temperatures and precipitation patterns can also alter phenology; plants inhabiting the gallery and dry forests might be particularly vulnerable to increasing variability in precipitation (Rakotondravony et al. 2018). An additional concern is that phenological mismatches due to species tracking climate change differently will impact ecological communities and function (Morellato et al. 2016). The reproduction of many lemur species has evolved to track availability of food resources; if plants in the dry forest change their phenology in response to water deficits and the ringtailed lemur (*Lemur catta*) and Verreaux's sifaka (*Propithecus verreauxi*) do not, these species may experience population declines (Rakotondravony et al. 2018).

An increase in the number, intensity, or duration of extreme events could negatively impact Madagascar's biodiversity. For example, drought can reduce survival of plant species and thus reduce productivity (Rakotondravony et al. 2018). Alternatively, it is possible that plant productivity will increase due to CO₂ fertilization (Lawal et al. 2019). Extreme events can also indirectly impact ecosystems. For instance, people may be able to use new openings in the forest to reach forest areas that were previously inaccessible (Waeber et al. 2015). Habitat destruction after extreme events can also accelerate the spread of invasive species (Rakotondravony et al. 2018).

Climate change is likely to exacerbate other anthropogenic threats to Madagascar's terrestrial ecosystems. Deforestation is exacerbated by extreme climate events; for example, the Menabe region has lost over 60% of its forest cover over the last 10 years as people have immigrated to avoid the drought in the south (USAID Mikajy/Hay Tao interview, WWF interview). A recent study projected that suitable habitat for two critically endangered ruffed lemurs (*Varecia variegata* and *V. rubra*) will decline by 62% in a scenario of no new deforestation in protected areas, and 81% in a scenario in which deforestation in protected areas continues (Morelli et al. 2020). Climate change may also indirectly affect lemur populations; if climate change leads to greater food insecurity, individuals may increase hunting of wildlife such as lemurs (Borgerson et al. 2016)

On the ground climate adaptation activities and other opportunities:

Ecosystems that are already degraded from non-climate stressors are less resilient to a changing climate. Therefore, increasing enforcement of protected areas, maintaining the integrity of intact forests, promoting restoration of additional habitats, and addressing underlying causes of deforestation are key adaptation strategies for Madagascar (Busch et al. 2012, Morelli et al. 2020). Preventing forest loss and degradation is cheaper and more effective than restoring forests after they have been destroyed, although reforestation will likely still be needed to conserve some species (Busch et al. 2012). Protecting corridors to allow species to shift their distributions as the climate changes will be particularly important (Kremen et al. 2008, Busch et al. 2012).

Several organizations are working on reforestation. One concern is that many organizations are planting invasive species rather than native trees. Although plants like eucalyptus and pine grow quickly and provide rapid benefits in terms of fuel and soil stabilization, they can have negative ecological effects (Baohanta et al. 2012, Ferreira et al. 2019). Therefore, wherever possible, sustainably harvested seeds from local endemic trees should be used for reforestation efforts. Acacia is an option being used by some reforestation projects, (e.g., UNDP interview, Tany Meva interview). Ny Tanantsika is working with communities to collect and plant seeds from native tree species (Ny Tanantsika interview). Conservation International is planting native species in core protected areas but working with communities on agroforestry in the buffer areas (CI interview). However, changing behavior and species preferences in communities can be challenging and inhibit adoption (Commune Ambalavao visit), therefore more effort is needed to communicate the benefits of native species with local communities.

Many organizations are also working to promote capacity building and sustainable livelihoods, such as more sustainable agricultural practices, agroforestry, and supporting value chains (e.g., Tany Meva, Wildlife Conservation Society (WCS), USAID Mikajy), or family planning (e.g., WCS) to reduce deforestation pressure. Securing land tenure is another strategy that may reduce encroachment into protected areas because it may motivate farmers to invest in their land rather than moving into the forest (USAID Strengthening Entrepreneurship and Enterprise Development (SEED) interview).

DISCUSSION

Climate change will increasingly affect important sectors in Madagascar, including water resources, agriculture, coastal and terrestrial ecosystems, fisheries, and human health. We have documented observed and potential climate change effects and possible adaptation measures (Table 1).

All sectors included in this review are connected; changes are not happening in isolation (Fig. 2). For example, lack of water infrastructure can exacerbate drought impacts. Droughts and associated agricultural declines can increase food insecurity and ultimately result in malnutrition and reduced health (Rakotoarison et al. 2018). Agricultural declines may also lead to increased deforestation as farmers expand areas of cultivation to compensate for reduced crop yields (Desbureaux and Damania 2018). Similarly, reduced agricultural output could lead to increased fishing activities and overfishing (WWF interview). Preliminary analysis suggests a significant increase in health-center admissions about one year after a severe drought, illustrating the complexity of the water-food production-human health relationship (Carrière et al. 2021). Increasing frequency of droughts in southern Madagascar is challenging development programs. In the past, organizations have known when food aid would be most needed, but recent changes in drought frequency have made this difficult (CRS interview). Increased foreign disaster assistance may be needed in the future. Continuing to provide humanitarian assistance without reducing underlying causes of vulnerability will not be an effective strategy moving forward (CRS/ADRA interview).

Table 1. List of climate change challenges and possible management actions to address them for multiple sectors in Madagascar.

Sector	Challenges	Management Actions
Water	Poor water infrastructure and reliance on ground water → sensitivity to projected decreases in annual rainfall Sea-level rise (SLR) → saltwater intrusion of groundwater along the coast	Investment in sustainable water infrastructure, especially at the local level Integrated water resources management for watersheds
Agriculture	Reliance on rainfed agriculture → sensitivity to variable rainfall Droughts, warming, and more intense cyclones and floods → decreased crop yields Reduced agricultural productivity can increase food insecurity	Changes to agricultural practices and infrastructure, such as changing crop calendars and promoting irrigation Adoption of climate-smart agriculture such as conservation agriculture and system of rice intensification Diversification of livelihoods and species and increased access to markets can reduce farmer vulnerability to climate shocks Integrate risk management into health-system activities and increase disaster-response capacity
Human health	Extreme weather → difficult to provide health care in isolated areas Extreme heat can increase heat-related mortality, especially for the elderly, young children, chronically ill, and the poor Changes in range of disease cycles and vectors → increased incidence of malaria Flooding → increased outbreaks of communicable diseases	Strengthen community resilience and access to basic health services Increase malaria control and awareness
Coastal ecosystems	SLR → coastal ecosystems submerged Cyclones and SLR can reduce mangrove cover Increased coral reef bleaching and erosion	Increase shore stabilization, such as installing dunes and rehabilitating sectors degraded by deflation Restore mangroves using species that are more salt tolerant Reef restoration efforts, although effectiveness uncertain
Fisheries	Coral reef bleaching and mangrove loss → reduced marine fish populations Extreme weather events → reduced fishing activities and length of the fishing season Changes in precipitation and forest cover → reduced freshwater flows and habitat for freshwater fish	Mangrove and coral reef restoration Alternative livelihoods and value chains
Terrestrial ecosystems	Species may shift ranges or phenology. Combined with habitat loss, iconic species may lose much of their habitat Loss of iconic species and ecosystems → reduced tourism	Reduce deforestation. Reforestation and restoration, especially with native species Increase enforcement of protected areas and create new protected areas Address underlying causes of deforestation (e.g., promote sustainable livelihoods)

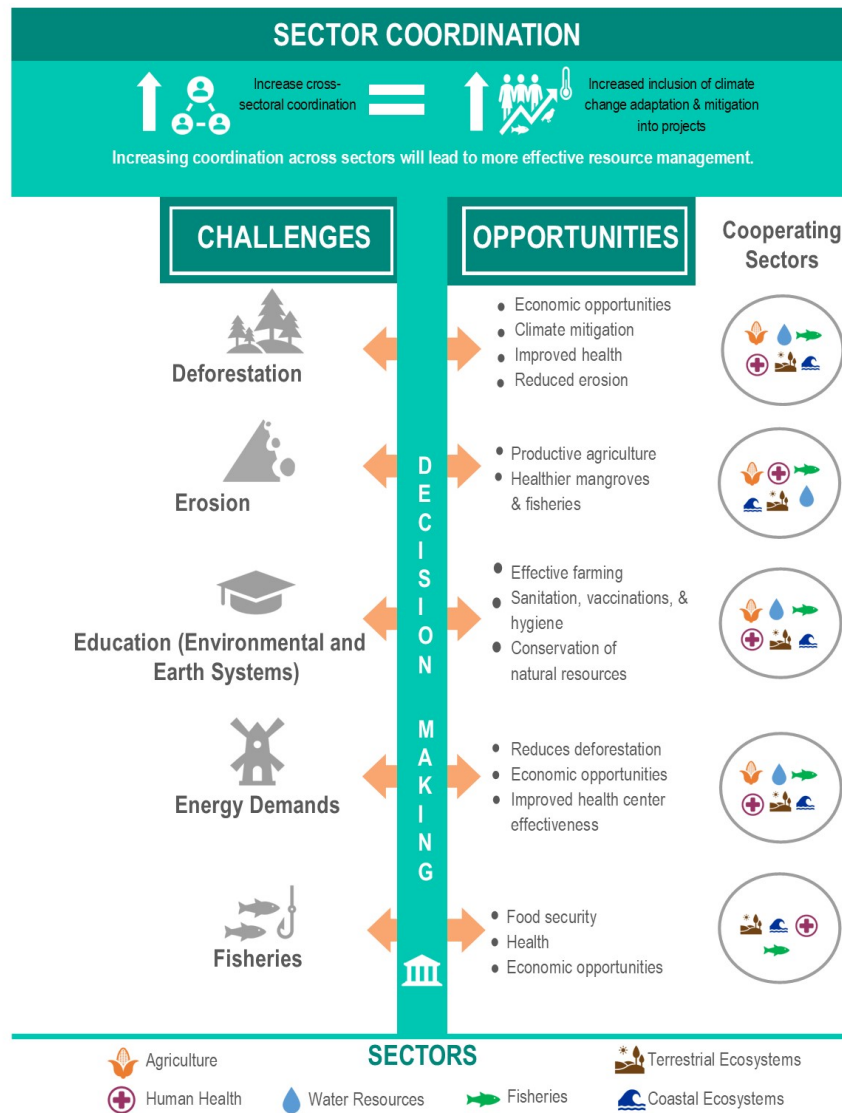
Protecting Madagascar's ecosystems continues to be an important strategy to promote adaptation capacity and human well-being (CI and WWF 2008). The biodiversity crisis in Madagascar affects more than just the flora and fauna of the country. Forests provide critical ecosystem services for the nearly 90% of Malagasy who rely on natural products including charcoal, fruit, livestock pasture, and medicinal plants (Waeber et al. 2015, Dave et al. 2017, Neudert et al. 2017, GIZ 2020). Deforestation can also increase flooding and siltation associated with cyclones, with consequences for agricultural yield and food security (Llopis 2018). For example, Cyclone Giovanna in 2012 caused significant crop loss that increased food insecurity for farmers (Rakotobe et al. 2016). Additionally, loss of Madagascar's ecosystems and biodiversity can reduce tourism and associated economic benefits, although in some cases, the benefits of ecotourism do not compensate for costs of forest protection at local and regional levels (Busch et al. 2012, Neudert et al. 2017).

Restoring degraded ecosystems is more costly and less effective than protecting intact ecosystems (Busch et al. 2012). Investing in improved cookstoves or alternative sources of energy could reduce dependence on charcoal, thus reducing deforestation while increasing economic opportunities (GIZ 2020). For example, WWF implemented a renewable energy project in which they trained women from rural areas to install and maintain solar systems in their villages (WWF interview). Installing solar panels in rural areas could also improve health care services in facilities that lack electricity (Marofandilia CSB2 visit; health center).

Although direct work on biodiversity and forest conservation is essential, most organizations that we interviewed have been stepping back from direct conservation activities to implement projects that strengthen local communities (WWF interview, USAID interview). For example, many organizations are working to improve agricultural practices, with the hope that it will reduce encroachment into protected areas. However, adoption and sustained use of new practices is challenging, especially when they involve investing in inputs or agricultural equipment. For example, although benefits of conservation agriculture accumulate over time, initial crop responses may be small or highly variable, and farmers may not see immediate benefits (Corbeels et al. 2014). This is a severe constraint for resource-poor farmers, and even when farmers do adopt these techniques, they may not maintain them after short-term project funding has ceased (Lima, 2014). Therefore, there is a need for more long-term partnerships with farmers (Penot et al. 2018). A recent survey of farmers in the Lake Alaotra region found that even though farmers reported increased and more stable yields while using CA, 39% of farmers stopped using the technique, citing a variety of social, economic, and technical factors (Penot et al. 2018). Groupement Semis Direct Madagascar has found that techniques that have clear results for farmers, such as composting, are more likely to be used after the project ends (GSDM interview).

In the long run, addressing key aspects of vulnerability such as improving education and health and reducing poverty will help people adapt to climate change (Asafu-Adjaye 2014). Education

Fig. 2. Interlinkages among sectors in adapting to climate change. Addressing non-climate stressors (Challenges) will make the system more resilient to climate and allow for increased socioeconomic and ecological sustainability (Opportunities). Efforts across multiple sectors are required to address the challenges that face Madagascar.



and awareness raising is a general strategy that is important for promoting adaptive capacity in Madagascar (D'agata et al. 2020). Many organizations are working to increase community knowledge regarding health (e.g., sanitation, vaccines, hygiene), effective farming practices, and the benefits of environmental conservation. Opportunities exist to leverage existing educational infrastructure to support multiple development goals simultaneously. For example, community health agents and health-care centers that are already working with communities to promote healthy behaviors could also provide information on the benefits of environmental sustainability.

One challenge for development organizations is that they can only work with a subset of communities, and the government has limited resources to enforce forest boundaries, making it difficult to control deforestation. Moreover, no organizations that we interviewed have assessed the success of these interventions so far. In fact, there is insufficient evidence that community-based extractive resource management promotes effective biodiversity conservation in the terrestrial developing world context, and success is context specific (Sayer et al. 2017, Gardner et al. 2018). Developing the capacity of government bodies and local authorities to sustainably manage protected areas, and developing

a monitoring system to track progress may improve project effectiveness (WWF interview).

Although our understanding of climate change in Madagascar has improved in recent years, there are still uncertainties and knowledge gaps that challenge development organizations trying to incorporate climate resilience into development projects (Appendix 3). In some areas, baseline climate and weather data on a local scale are lacking, which makes developing fine-scale projections of areas at risk of floods, droughts, SLR, and cyclones difficult. Even where these data do exist, greater translation and communication of the information and how it can be used is needed. In addition to basic climate information, there is a lack of climate change impact modeling on a local scale. For example, how will climate change impact agricultural yields of important crops in different locations across the island? On an ecological level, there are still uncertainties regarding how specific species and ecosystems will respond to climate change. One such uncertainty is that while there is a general expectation that species will shift their ranges to maintain their preferred temperature and precipitation niches, it is difficult to predict which species will shift first and by how much. Moreover, species may respond to climate change in different ways and at different rates, which could impact species interactions and other ecosystem functions. Finally, more work is needed regarding how the impacts of climate change are likely to affect human communities. As such, mapping socio-economic vulnerability to climate change could assist with spatial planning. Information regarding economic impacts and changes in livelihood would also be useful, especially regarding which livelihood activities might be most resilient to climate changes in different locations. Tools like scenario planning (Cobb and Thompson 2012) and structured decision making (Gregory et al. 2012) can help organizations develop project plans that account for uncertainty.

Although linkages between sectors is complex and uncertainties remain, there is an opportunity for the Government of Madagascar, development organizations, NGOs, and the private sector to leverage funds and work across sectors to address challenges (Fig. 2). For example, reducing deforestation would reduce erosion, which could increase agricultural productivity and human health, and would also reduce siltation that is degrading coastal ecosystems. These benefits would provide increased economic opportunities for communities, which in turn would increase community resilience to climate shocks.

CONCLUSIONS

Climate change has and will continue to affect important sectors in Madagascar. Climate and non-climate stressors interact and can exacerbate negative consequences, so addressing underlying vulnerabilities including high-poverty rates, food insecurity, and population growth can help reduce negative impacts. As development organizations design new projects, leveraging expertise, funds, and activities in other sectors would be beneficial as sectoral challenges and opportunities are linked. In addition, increased coordination between the Government of Madagascar, development organizations, NGOs, and the private sector to promote more sustainable and climate-smart adaptation activities will help Madagascar prepare for and respond to this emerging challenge.

Responses to this article can be read online at:

<https://www.ecologyandsociety.org/issues/responses.php/12816>

Acknowledgments:

Any use of trade, firm, or product names is for descriptive purposes only and does not imply endorsement by the U.S. Government. Funding for this activity was provided by the U.S. Agency for International Development under a partnership with the U.S. Department of the Interior's International Technical Assistance Program (DOI-ITAP). We further recognize the many individuals and organizations who participated in interviews. We thank Ethan Taylor, Olivia Anton, and the staff of USAID Madagascar Mission for their support and insight at various stages of this project. Our special thanks to Salohy Soloarivelo, Serge Ramanantsoa, and Miorafitiavana Harivelomanana of USAID Madagascar Mission for their technical and logistical support, Dr. Christiane Randriamampionona for her translation support during stakeholder meetings, and Kristen Donahue for graphic design.

Data Availability:

Data/code sharing is not applicable to this article because no data/code were analyzed in this study.

LITERATURE CITED

- Amusan, L., and F. Odimegwu. 2015. Development at the crossroad in the age of climate change in Africa: crises of adaptation and human security in the 21st century. *Environmental Economics* 6(2):132-140. [online] URL: https://www.businessperspectives.org/images/pdf/applications/publishing/templates/article/assets/6680/ee_2015_02_Amusan.pdf
- Andrea Mboyerwa, P. 2018. Potentials of system of rice intensification (SRI) in climate change adaptation and mitigation. A review. *International Journal of Agricultural Policy and Research* 6:160-168. <https://doi.org/10.15739/IJAPR.18.018>
- Asafu-Adjaye, J. 2014. The economic impacts of climate change on agriculture in Africa. *Journal of African Economies* 23 (SUPPL.2):ii17-ii49. <https://doi.org/10.1093/jae/eju011>
- Bamford, A. J., F. Razafindrajao, R. P. Young, and G. M. Hilton. 2017. Profound and pervasive degradation of Madagascar's freshwater wetlands and links with biodiversity. *PLoS ONE* 12 (8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182673>
- Baohanta, R., J. Thioulouse, H. Ramanankierana, Y. Prin, R. Rasolomampianina, E. Baudoin, N. Rakotoarimanga, A. Galiana, H. Randriambanona, M. Lebrun, and R. Duponnois. 2012. Restoring native forest ecosystems after exotic tree plantation in Madagascar: combination of the local ectotrophic species *Leptolena bojeriana* and *Uapaca bojeri* mitigates the negative influence of the exotic species *Eucalyptus camaldulensis* and *Pinus patula*. *Biological Invasions* 14(11):2407-2421. <https://doi.org/10.1007/s10530-012-0238-5>

- Benson, L., L. Glass, T. G. Jones, L. Ravaoarinrotsihoarana, and C. Rakotomahazo. 2017. Mangrove carbon stocks and ecosystem cover dynamics in southwest Madagascar and the implications for local management. *Forests* 8(6):190. <https://doi.org/10.3390/f8060190>
- Benstead, J. P., P. H. De Rham, J.-L. Gattolliat, F.-M. Gibon, P. V. Loiselle, M. Sartori, J. S. Sparks, and M. L. J. Stiassny. 2003. Conserving Madagascar's freshwater biodiversity. *BioScience* 53(11):1101-1111. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[1101:CMFBJ2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[1101:CMFBJ2.0.CO;2)
- Borgerson, C., M. A. McKean, M. R. Sutherland, and L. R. Godfrey. 2016. Who hunts lemurs and why they hunt them. *Biological Conservation* 197:124-130. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.02.012>
- Brown, J. L., and A. D. Yoder. 2015. Shifting ranges and conservation challenges for lemurs in the face of climate change. *Ecology and Evolution* 5(6):1131-1142. <https://doi.org/10.1002/ece3.1418>
- Busch, J., R. Dave, L. Hannah, A. Cameron, A. Rasolohery, P. Roehrdanz, and G. Schatz. 2012. Climate change and the cost of conserving species in Madagascar. *Conservation Biology* 3:408-419. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01838.x>
- Caminade, C., S. Kovats, J. Rocklov, A. M. Tompkins, A. P. Morse, F. J. Colón-González, H. Stenlund, P. Martens, and S. J. Lloyd. 2014. Impact of climate change on global malaria distribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(9):3286-3291. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302089111>
- Carrière, S. D., T. Health, P. F. M. Rakotomandrindra, C. Ollivier, R. E. Rajaomahefasoa, H. A. Rakoto, J. Lapegue, Y. E. Rakotoarison, M. Mangin, J. Kepmf, T. Razakamanana, and K. Chalikakis. 2021. Long-term groundwater resource observatory for Southwestern Madagascar. *Hydrological Processes* 35(3): e14108. <https://doi.org/10.1002/hyp.14108>
- Cattiaux, J., F. Chauvin, O. Bousquet, S. Malardel, and C.-L. Tsai. 2020. Projected changes in the southern Indian Ocean cyclone activity assessed from high-resolution experiments and CMIP5 models. *Journal of Climate* 33(12):4975-4991. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0591.1>
- Cellule de Prévention et Gestion des Urgences (CPGU), and Bureau National de Coordination des Changements Climatiques (BNCCC). 2017. Strategic program for climate resilience: Madagascar pilot program for climate resilience. Government of Madagascar, Antananarivo, Madagascar. [online] URL: https://www.primature.gov.mg/cpgu/wp-content/uploads/2017/11/SPCR_Madagascar_FINAL-10-11-17-1.pdf
- Central Intelligence Agency. 2020. The world factbook - Africa: Madagascar. CIA, Washington, D.C., USA. [online] URL: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/madagascar/>
- Chesney, R., and A. M. Moran. 2016. Climate, conflict, and governance in Africa: pinpointing risks and opportunities: final program report: 2009-2016. Strauss Center's Climate Change and African Political Stability, Austin, Texas, USA. [online] URL: <https://www.strausscenter.org/news/ccaps-final-program-report-on-climate-conflict-and-governance-in-africa>
- Cinner, J. E., T. R. McClanahan, N. A. J. Graham, T. M. Daw, J. Maina, S. M. Stead, A. Wamukota, K. Brown, and O. Bodin. 2012. Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries. *Global Environmental Change* 22(1):12-20. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.09.018>
- Clausen, A., H. Rakotondrazafy, H. Q. Ralison, and A. Andriamanalina. 2010. Mangrove ecosystems in western Madagascar: an analysis of vulnerability to climate change. World Wild Fund for Nature, Gland, Switzerland.
- Cobb, A. N., and J. L. Thompson. 2012. Climate change scenario planning: a model for the integration of science and management in environmental decision-making. *Environmental Modelling and Software* 38:296-305. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.06.012>
- Cochrane, K. L., H. Rakotondrazafy, S. Aswani, T. Chaigneau, N. Downey-Breedt, A. Lemahieu, A. Paytan, G. Pecl, E. Plagányi, E. Popova, E. I. van Putten, W. H. H. Sauer, V. Byfield, M. A. Gasalla, S. J. van Gennip, W. Malherbe, A. Rabary, A. Rabearisoa, N. Ramaroson, V. Randrianarimanana, L. Scott, and P. M. Tsimanaoraty. 2019. Tools to enrich vulnerability assessment and adaptation planning for coastal communities in data-poor regions: application to a case study in Madagascar. *Frontiers in Marine Science* 5(JAN). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00505>
- Conservation International (CI) and World Wide Fund for Nature (WWF). 2008. Assessing the impacts of climate change on Madagascar's biodiversity and livelihoods: a workshop report. Conservation International, Antananarivo, Madagascar. [online] URL: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADW661.pdf
- Corbeels, M., J. de Graaff, T. H. Ndah, E. Penot, F. Baudron, K. Naudin, N. Andrieu, G. Chirat, J. Schuler, I. Nyagumbo, L. Rusinamhodzi, K. Traore, H. D. Mzoba, and I. S. Adolwa. 2014. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: a multi-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 187:155-170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.011>
- Côté-Laurin, M. C., S. Benbow, and K. Erzini. 2017. The short-term impacts of a cyclone on seagrass communities in Southwest Madagascar. *Continental Shelf Research* 138:132-141. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.03.005>
- D'agata, S., E. S. Darling, G. G. Gurney, T. R. McClanahan, N. A. Muthiga, A. Rabearisoa, and J. M. Maina. 2020. Multiscale determinants of social adaptive capacity in small-scale fishing communities. *Environmental Science and Policy* 108:56-66. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.03.006>
- Dave, R., E. L. Tompkins, and K. Schreckenber. 2017. Forest ecosystem services derived by smallholder farmers in northwestern Madagascar: storm hazard mitigation and participation in forest management. *Forest Policy and Economics* 84:72-82. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.09.002>
- Davis-Reddy, C., and K. Vincent. 2017. Climate risk and vulnerability: a handbook for Southern Africa. Second edition. CSIR, Pretoria, South Africa. [online] URL: https://www.csir.co.za/sites/default/files/Documents/SADC%20Handbook_Second%20Edition_full%20report.pdf

- Dawson, A. 2016. Simulated impacts of climate change adaption strategies on productivity in smallholder farms in Southwest Madagascar. Thesis. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands. [online] URL: <https://edepot.wur.nl/396256>
- Delille, H. 2011. Perceptions et stratégies d'adaptation paysannes face aux changements climatiques à Madagascar. Agronomes et vériculteurs sans frontières, Lyon, France. [online] URL: <https://www.avsf.org/en/posts/704/full/perceptions-et-strategies-d-adaptation-paysannes-face-aux-changements-climatiques-a-madagascar>
- Desbureaux, S., and R. Damania. 2018. Rain, forests and farmers: evidence of drought induced deforestation in Madagascar and its consequences for biodiversity conservation. *Biological Conservation* 221:357-364. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.03.005>
- Djaman, K., P. M. Ndiaye, K. Koudahe, A. Bodian, L. Diop, M. O'Neill, and S. Irmak. 2018. Spatial and temporal trend in monthly and annual reference evapotranspiration in Madagascar for the 1980-2010 period. *International Journal of Hydrology* 2 (2). <https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00058>
- Ferreira, V., L. Boyero, C. Calvo, F. Correa, R. Figueroa, J. F. Gonçalves, G. Goyenola, M. A. S. Graça, L. U. Hepp, S. Kariuki, A. López-Rodríguez, N. Mazzeo, C. M'Erimba, S. Monroy, A. Peil, J. Pozo, R. Rezende, and F. Teixeira-de-Mello. 2019. A global assessment of the effects of eucalyptus plantations on stream ecosystem functioning. *Ecosystems* 22(3):629-642. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0292-7>
- Fitchett, J. M., and S. W. Grab. 2014. A 66-year tropical cyclone record for south-east Africa: temporal trends in a global context. *International Journal of Climatology* 34(13):3604-3615. <https://doi.org/10.1002/joc.3932>
- Ganzhorn, J. U., P. P. Lowry, G. E. Schatz, and S. Sommer. 2001. The biodiversity of Madagascar: one of the world's hottest hotspots on its way out. *Oryx* 35(4):346-348. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3008.2001.00201.x>
- García-Ruiz, J. M., S. Beguería, N. Lana-Renault, E. Nadal-Romero, and A. Cerdà. 2017. Ongoing and emerging questions in water erosion studies. *Land Degradation and Development* 28 (1):5-21. <https://doi.org/10.1002/ldr.2641>
- Gardner, C. J., M. E. Nicoll, C. Birkinshaw, A. Harris, R. E. Lewis, D. Rakotomalala, and A. N. Ratsifandrihamanana. 2018. The rapid expansion of Madagascar's protected area system. *Biological Conservation* 220:29-36. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.011>
- Gay-des-Combes, J. M., B. J. M. Robroek, D. Hervé, T. Guillaume, C. Pistocchi, R. T. E. Mills, and A. Buttler. 2017. Slash-and-burn agriculture and tropical cyclone activity in Madagascar: implication for soil fertility dynamics and corn performance. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 239:207-218. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.010>
- Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 2020. Programme d'appui à la gestion de l'environnement (PAGE) - Madagascar nos meilleures pratiques. Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Bonn, Germany. [online] URL: https://www.giz.de/en/downloads/giz2020_fr_page_madagascar.pdf
- Ghulam, A. 2014. Monitoring tropical forest degradation in Betampona Nature Reserve, Madagascar using multisource remote sensing data fusion. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7 (12):4960-4971. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2319314>
- Gregory, R., L. Failing, M. Harstone, G. Long, T. McDaniels, and D. Ohlson. 2012. Structuring environmental management choices. Pages 1-20 in R. Gregory, L. Failing, M. Harstone, G. Long, T. McDaniels, D. Ohlson, editors. *Structured decision making: a practical guide to environmental management choices*. John Wiley and Sons, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9781444398557.ch1>
- Hannah, L., R. Dave, P. P. Lowry, S. Andelman, M. Andrianarisata, L. Andriamaro, A. Cameron, R. Hijmans, C. Kremen, J. MacKinnon, H. H. Randrianasolo, S. Andriambololona, A. Razafimpahanana, H. Randriamahazo, J. Randrianarisoa, P. Razafinjatovo, C. Raxworthy, G. E. Schatz, M. Tadross, and L. Wilmé. 2008. Climate change adaptation for conservation in Madagascar. *Biology Letters* 4(5):590-594. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0270>
- Harvey, C. A., Z. L. Rakotobe, N. S. Rao, R. Dave, H. Razafimahatratra, R. H. Rabarijohn, H. Rajaofara, and J. L. MacKinnon. 2014. Extreme vulnerability of smallholder farmers to agricultural risks and climate change in Madagascar. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 369(1639). <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0089>
- Harzing, A. W. 2007. Publish or perish. [online] URL: <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
- Hsiang, S. M., and A. S. Jina. 2014. The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth: evidence from 6,700 cyclones. Working paper 20352. National Bureau of Economic Research, Cambridge, Massachusetts, USA. <https://doi.org/10.3386/w20352>
- International Panel on Climate Change (IPCC). 2019. Technical summary. Pages 37-70 in H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N. M. Weyer, editors. *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. IPCC, Geneva, Switzerland. [online] URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/technical-summary/>
- International Union for the Conservation of Nature (IUCN). 2018. The IUCN red list of threatened species. IUCN, Gland, Switzerland. [online] URL: <https://www.iucnredlist.org>
- Kier, G., H. Kreft, T. M. Lee, W. Jetz, P. L. Ibsch, C. Nowicki, J. Mutke, and W. Barthlott. 2009. A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (23):9322-9327. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810306106>
- Kremen, C., A. Cameron, A. Moilanen, S. J. Phillips, C. D. Thomas, H. Beentje, J. Dransfield, B. L. Fisher, F. Glaw, T. C. Good, G. J. Harper, R. J. Hijmans, D. C. Lees, E. Louis, Jr., R. A. Nussbaum, C. J. Raxworthy, A. Razafimpahanana, G. E. Schatz, M. Vences, D. R. Vieites, P. C. Wright, and M. L. Zjhra. 2008. Aligning conservation priorities across taxa in Madagascar with high-resolution planning tools. *Science* 320:222-226. <https://doi.org/10.1126/science.1155193>

- Kreppel, K. S., C. Caminade, S. Telfer, M. Rajerison, L. Rahalison, A. Morse, and M. Baylis. 2014. A non-stationary relationship between global climate phenomena and human plague incidence in Madagascar. *PLoS Neglected Tropical Diseases* 8(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003155>
- Kreppel, K. S., S. Telfer, M. Rajerison, A. Morse, and M. Baylis. 2016. Effect of temperature and relative humidity on the development times and survival of *Synopsyllus fonquerniei* and *Xenopsylla cheopis*, the flea vectors of plague in Madagascar. *Parasites and Vectors* 9(1):1-10. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1366-z>
- Kruger, L. 2016. The timing of agricultural production in hazard-prone areas to prevent losses at peak-risk periods: a case of Malawi, Madagascar and Mozambique. *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies* 8(2):1-9. <https://doi.org/10.4102/jamba.v8i2.179>
- Lal, R., B. R. Singh, D. L. Mwaseba, D. Kraybill, D. O. Hansen, and L. O. Eik. 2015. Sustainable intensification to advance food security and enhance climate resilience in Africa. Springer, New York, New York, USA. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09360-4>
- Lammers, P. L., T. Richter, P. O. Waeber, and J. Mantilla-Contreras. 2015. Lake Alaotra wetlands: how long can Madagascar's most important rice and fish production region withstand the anthropogenic pressure? *Madagascar Conservation and Development* 10(3):116-127. <https://doi.org/10.4314/mcd.v10i3.4>
- Lawal, S., C. Lennard, and B. Hewitson. 2019. Response of southern African vegetation to climate change at 1.5 and 2.0° global warming above the pre-industrial level. *Climate Services* 16(November):100134. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100134>
- Lemahieu, A., L. Scott, W. S. Malherbe, P. T. Mahatante, J. V. Randrianarimanana, and S. Aswani. 2018. Local perceptions of environmental changes in fishing communities of southwest Madagascar. *Ocean and Coastal Management*, 163:209-221. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.06.012>
- Lima, M. G. B. 2014. Policies and practices for climate-smart agriculture in sub-Saharan Africa: a comparative assessment of challenges and opportunities across 15 countries. Food Agriculture, Natural Resources Policy Analysis Network, Pretoria, South Africa. [online] URL: https://media.africaportal.org/documents/Regional_Synthesis_Report_Comprehensive_Scoping_Assessment_of_CSA_Policies.pdf
- Llopis, J. C. 2018. Down by the riverside: cyclone-driven floods and the expansion of swidden agriculture in South-western Madagascar. Pages 241-268 in J. Abbink, editor. The environmental crunch in Africa: growth narratives vs. local realities. Springer International, New York, New York, USA. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77131-1_9
- Malherbe, J., F. A. Engelbrecht, and W. A. Landman. 2013. Projected changes in tropical cyclone climatology and landfall in the Southwest Indian Ocean region under enhanced anthropogenic forcing. *Climate Dynamics* 40:2867-2886. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1635-2>
- Mavume, A. F., L. Rydberg, M. Rouault, and J. Lutjeharms. 2010. Climatology and landfall of tropical cyclones in the South-west Indian Ocean. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science* 8(1). <https://doi.org/10.4314/wiojms.v8i1.56672>
- Morellato, L. P. C., B. Alberton, S. T. Alvarado, B. Borges, E. Buisson, M. G. G. Camargo, L. F. Cancian, D. W. Carstensen, D. F. E. Escobar, P. T. P. Leite, I. Mendoza, N. M. W. B. Rocha, N. C. Soares, T. S. F. Silva, V. G. Staggemeier, A. S. Streher, B. C. Vargas, and C. A. Peres. 2016. Linking plant phenology to conservation biology. *Biological Conservation* 195:60-72. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.12.033>
- Morelli, T. L., A. B. Smith, A. N. Mancini, E. A. Balko, C. Borgerson, R. Dolch, Z. Farris, S. Federman, C. D. Golden, S. M. Holmes, M. Irwin, R. L. Jacobs, S. Johnson, T. King, S. M. Lehman, E. E. Louis, A. Murphy, H. N. T. Randriahaingo, H. L. L. Randrianarimanana, J. Ratsimbazafy, O. H. Razafindratsima, and A. L. Baden. 2020. The fate of Madagascar's rainforest habitat. *Nature Climate Change* 10(1):89-96. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0647-x>
- Muthige, M. S., J. Malherbe, F. A. Engelbrecht, S. Grab, A. Beraki, T. R. Maisha, and J. Van der Merwe. 2018. Projected changes in tropical cyclones over the South West Indian Ocean under different extents of global warming. *Environmental Research Letters* 13(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabc60>
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca, and J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nematchoua, M. K., P. Ricciardi, J. A. Orosa, and C. Buratti. 2018. A detailed study of climate change and some vulnerabilities in Indian Ocean: a case of Madagascar island. *Sustainable Cities and Society* 41(January):886-898. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.040>
- Neudert, R., J. U. Ganzhorn, and F. Wätzold. 2017. Global benefits and local costs - the dilemma of tropical forest conservation: a review of the situation in Madagascar. *Environmental Conservation* 44(1):82-96. <https://doi.org/10.1017/S0376892916000552>
- Ngwakwe, C. 2019. Relating climate change-induced temperature with grain production: a financial implication framework. *EuroEconomica* 38(1) [online] URL: <http://journals.univ-danubius.ro/index.php/euroeconomica/article/view/4881>
- Niang, I., O. C. Ruppel, M. A. Abdrabo, A. Essel, C. Lennard, J. Padgham, and P. Urquhart. 2015. Africa. Pages 1199-1266 in V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White, editors. *Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability: part B: regional aspects: Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386.002>
- Nurse, L. A., R. F. McLean, J. Agard, L. P. Briguglio, V. Duvat-Magnan, N. Pelesikoti, E. Tompkins, and A. Webb. 2014. Small

- islands. Pages 1613-1654 in V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White, editors. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability; part B: regional aspects: Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386>
- Oppenheimer, M., B. C. Glavovic, J. Hinkel, R. Van De Wal, A. K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R. M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meysing, and Z. Sebesvari. 2019. Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities. Pages 321-311 in H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N. M. Weyer, editors. *The ocean and cryosphere in a changing climate: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. [online] URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/08_SROC-C_Ch04_FINAL.pdf
- Pacifici, M., W. B. Foden, P. Visconti, J. E. M. Watson, S. H. M. Butchart, K. M. Kovacs, B. R. Scheffers, D. G. Hole, T. G. Martin, H. R. Akçakaya, R. T. Corlett, B. Huntley, D. Bickford, J. A. Carr, A. A. Hoffmann, G. F. Midgley, P. Pearce-Kelly, R. G. Pearson, S. E. Williams, S. G. Willis, B. Young, and C. Rondinini. 2015. Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change* 5:215-225. <https://doi.org/10.1038/nclimate2448>
- Penot, E., V. Fevre, P. Flodrops, and H. M. Razafimahatratra. 2018. Conservation agriculture to buffer and alleviate the impact of climatic variations in Madagascar: farmers' perception. *Cahiers Agricultures* 27(2). <https://doi.org/10.1051/cagri/2018009>
- Raholijao, N., T. A. Arivelo, Z. A. P. H. Rakotomavo, D. Voahangin-dRakotoson, G. Srinivasan, J. Shanmugasundaram, I. Dash, and J. Qiu. 2019. Les tendances climatiques et les futurs changements climatiques a Madagascar - 2019. Government of Madagascar, Antananarivo, Madagascar. [online] URL: https://www.primature.gov.mg/cpgu/wp-content/uploads/2019/11/Publication_FR_09_Sept_Version_Finale.pdf
- Rakotoarison, N., N. Raholijao, L. M. Razafindramavo, Z. A. P. H. Rakotomavo, A. Rakotoarisoa, J. S. Guillemot, Z. J. Randriamialisoa, V. Mafilaza, V. A. M. P. Ramiandrisoa, R. Rajaonarivony, S. Andrianjafinirina, V. Tata, M. C. Vololoniaina, F. Rakotomanana, and V. M. Raminosoa. 2018. Assessment of risk, vulnerability and adaptation to climate change by the health sector in Madagascar. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(12):2643. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122643>
- Rakotobe, Z. L., C. A. Harvey, N. S. Rao, R. Dave, J. C. Rakotondravelo, J. Randrianarisoa, S. Ramanahadray, R. Andriambolantsoa, H. Razafimahatratra, R. H. Rabarijohn, H. Rajaofara, H. Rameson, and J. L. MacKinnon. 2016. Strategies of smallholder farmers for coping with the impacts of cyclones: a case study from Madagascar. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 17:114-122. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.04.013>
- Rakotondravony, H. A., I. Abdallah, H. Andrianaivo, L. N. Andrianarison, K. Hetz, P. T. Mahatante, H. N. Masezamana, N. A. H. Rakotoarivony, R. P. Rakotonaivo, S. Ramanantsialonina, J.-F. Randrianjatovo, A. A. Rasamison, and M. S. (adelphi/GOPA). 2018. État des lieux des études de la vulnérabilité à Madagascar: revue bibliographique. Antananarivo, Madagascar. GIZ, Bonn, Germany.
- Rakotondrazafy, H., M. Fischborn, T. Ramahaleo, V. Ramahery, M. Rakotoarijaona, and H. Bakarizafy. 2014. Pioneering climate change adapted marine protected area management in Madagascar. Pages 74-82 in R. Murti and C. Buyck, editors. *Safe havens: protected areas for disaster risk reduction and climate change adaptation*. IUCN, Gland, Switzerland. [online] URL: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2014-038.pdf>
- Rinkevich, B. 2019. The active reef restoration toolbox is a vehicle for coral resilience and adaptation in a changing world. *Journal of Marine Science and Engineering*. 7(7):201. <https://doi.org/10.3390/jmse7070201>
- Ryan, S. J., A. McNally, L. R. Johnson, E. A. Mordecai, T. Ben-Horin, K. Paaijmans, and K. D. Lafferty. 2015. Mapping physiological suitability limits for malaria in Africa under climate change. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases* 15(12):718-725. <https://doi.org/10.1089/vbz.2015.1822>
- Samy, A. M., A. H. Elaagip, M. A. Kenawy, C. F. J. Ayres, A. T. Peterson, and D. E. Soliman. 2016. Climate change influences on the global potential distribution of the mosquito *Culex quinquefasciatus*, vector of West Nile virus and lymphatic filariasis. *PLoS ONE* 11(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163863>
- Sayer, J., C. Margules, and A. K. Boedhihartono. 2017. Will biodiversity be conserved in locally-managed forests? *Land* 6(1):6. <https://doi.org/10.3390/land6010006>
- Serele, C., A. Pérez-Hoyos, and F. Kayitakire. 2019. Mapping of groundwater potential zones in the drought-prone areas of south Madagascar using geospatial techniques. *Geoscience Frontiers* 11:1403-1413. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.11.012>
- Shi, W., and F. Tao. 2014. Vulnerability of African maize yield to climate change and variability during 1961-2010. *Food Security* 6(4):471-481. <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0370-4>
- Shultz, J. M., J. Russell, and Z. Espinel. 2005. Epidemiology of tropical cyclones: the dynamics of disaster, disease, and development. *Epidemiologic Reviews* 27:21-35. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxi011>
- Spinoni, J., G. Naumann, H. Carrao, P. Barbosa, and J. Vogt. 2014. World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology* 34(8):2792-2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>
- Tadross, M., L. Randriamarolaza, Z. Rabefitia, and Z. K. Yip. 2008. Climate change in Madagascar, recent past and future climate change in Madagascar ; recent past and future. Climate Systems Analysis Group, Washington, D.C., USA.
- Thornton, P. K., R. B. Boone, and J. Ramirez-Villegas. 2015. Climate change impacts on livestock. Working Paper No. 120.

CGIAR, Montpellier, France. [online] URL: <https://ccafs.cgiar.org/resources/publications/climate-change-impacts-livestock>

United Nations Development Programme (UNDP). 2015. Human development report 2015: work for human development. United Nations Development Programme, New York, New York, USA. <http://hdr.undp.org/en/content/human-development-report-2015>

Veron, S., M. Mouchet, R. Govaerts, T. Haevermans, and R. Pellens. 2019. Vulnerability to climate change of islands worldwide and its impact on the tree of life. *Scientific Reports* 9 (1):14471. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51107-x>

Vieilledent, G., C. Grinand, F. A. Rakotomalala, R. Ranaivosoa, J.-R. Rakotoarijaona, T. F. Allnutt, and F. Achard. 2018. Combining global tree cover loss data with historical national forest cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Biological Conservation* 222:189-197. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.008>

Veites, D. R., K. C. Wollenberg, F. Andreone, J. Köhler, F. Glaw, and M. Vences. 2009. Vast underestimation of Madagascar's biodiversity evidenced by an integrative amphibian inventory. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (20):8267-8272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810821106>

Waeber, P. O., L. Wilmé, B. Ramamonjisoa, C. Garcia, D. Rakotomalala, Z. H. Rabemananjara, C. A. Kull, J. U. Ganzhorn, and J.-P. Sorg. 2015. Dry forests in Madagascar: neglected and under pressure. *International Forestry Review* 17(2):127-148. <https://doi.org/10.1505/146554815815834822>

World Food Programme (WFP). 2020. Rising hunger in drought-stricken southern Madagascar forcing families to eat insects. United Nation News. UN, New York, New York, USA. [online] URL: <https://news.un.org/en/story/2020/11/1078662#:~:text=Hunger>

World Health Organization (WHO), and United Nations Children's Fund (UNICEF). 2017. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities. United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, New York, New York, USA. [online] URL: <https://www.unicef.org/reports/progress-on-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2019>

World Health Organization (WHO). 2016. Climate and health country profile-2015 Madagascar. World Health Organization, Geneva, Switzerland. [online] URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/246140>

Zougmoré, R. B., S. T. Partey, M. Ouédraogo, E. Torquebiau, and B. M. Campbell. 2018. Facing climate variability in sub-Saharan Africa: analysis of climate-smart agriculture opportunities to manage climate-related risks. *Cahiers Agricultures* 27(3):34001. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018019>

Appendix #1: Stakeholder organizations interviewed for this report.

Table A1.1: Stakeholder organizations interviewed for this report

Organization Name	Organization Type	Sectoral Focus
BNCCC REDD+	Government – Madagascar	Climate change mitigation, natural resources management
Direction Générale de la Météorologie	Government - Madagascar	Climate and weather information
PROSPERER	Government – Madagascar	Support program for rural microenterprises, including those related to agriculture, fisheries, etc.
USAID Program Office	USAID	All sectors included in analysis
USAID HPN office	USAID	Human health
USAID IDEA office	USAID	Development emergency assistance
USAID SEED team	USAID	Environment and economic development
Access	USAID funded projects	Human health
Hay Tao	USAID funded projects	Natural Resources Management, Fisheries, and Forestry sectors.
Impact	USAID funded projects	Human health
Mahefa Miraka	USAID funded projects	Human health
Mikajy	USAID funded projects	Agriculture, Water, Fisheries, Natural Resources Management, Forestry
Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)	Government - German	Multiple, but for the purpose of this interview: Agriculture, climate change information/adaptation, livelihoods
UN Development Programme (UNDP)	United Nations	Multiple, but for the purpose of this interview: Agriculture, forestry, fisheries, protected areas management, climate change information
Groupe Thematique Changement Climatique	Mixed climate change coordination group	All sectors included in analysis
Adventist Development & Relief Agency (ADRA)	NGO	Food security, agriculture, livelihoods
Catholic Relief Services (CRS)	NGO	Food security, agriculture, livelihoods

Community Centered Conservation (C3)	NGO	Biodiversity conservation, fisheries, agriculture
Conservation International (CI)	NGO	Agriculture, Water Resources Management, Fisheries, Natural Resources Management, Forestry
Groupement Semis Direct Madagascar (GSDM)	NGO	Agriculture and agroforestry
Ny Tanintsika	NGO	Natural resource management, livelihoods, education, water, health
Tany Meva	NGO	Agriculture, water management, fisheries, natural resources management, forestry, human health, infrastructure
Wildlife Conservation Society (WCS)	NGO	Protected area management, agriculture, water resources management, fisheries, community-based natural resources management, forestry, human health
World Bank	International Organization	Multiple, but for the purpose of this interview: Agriculture, water management, forestry, fisheries, health
World Wildlife Fund (WWF)	NGO	Biodiversity conservation, forestry, fisheries livelihoods
Commune Ambalavao	Madagascar village	All
Kirindy Village	Madagascar village	All
Lovobe Bay commune	Madagascar village	All
Bemanonga CSB2	Health Center	Health
Marofandilia CSB2	Health Center	Health
Morondava CSB2	Health Center	Health

Appendix #2: Questions provided to stakeholders prior to interviews to guide discussions

1. Please describe what sector your organization works in: Agriculture, Water Resources Management, Fisheries, Natural Resources Management, Forestry, Human Health, Transportation, other?
2. To what extent does your organization consider the effects of a changing climate on the resources or issues of interest to your organization? What, if any, measures have you taken to prepare for or adapt to climate change impacts?
3. What are the greatest climate challenges you have observed that affect Madagascar?
4. To what extent have climate-related challenges (cyclones, heat waves, flooding, drought, wildfire, storm surge, etc.) affected your organization's ability to carry out its mission?
5. What climate information gaps do you see as critical for filling in order to better adapt to climate change?
6. Please send us any resources about your organization and/or projects that may be useful for us to read ahead of our meeting.

Appendix #3: Information gaps identified during the literature review and interviews

While there is some information regarding climate change impacts, there is a considerable lack of information specific to Madagascar (Benson et al., 2017; Cochrane et al., 2019; CPGU and BNCCC, 2017; García-Ruiz et al., 2017; IPCC, 2019; Oppenheimer et al., 2019; Rakotondrazafy et al., 2014; Serele et al., 2019). The categories of information needs that emerged from our interviews and literature review include:

- Climate information
 - Some areas do not have accurate climate or weather information at a fine enough scale (e.g. many places have regional weather data rather than local, so it is often inaccurate as there is a lot of variation over the region). In terms of long-term risks, finer scale information on which areas are at risk to floods, droughts, cyclones, relative SLR, etc. could be useful for planning specific projects.
 - Research on cyclones
 - There is a need for greater communication and interpretation of existing data at the regional and local level (i.e. translational science. How should users change behavior based on climate information?
 - Impact modeling, especially for climate impacts at the local scale (e.g. for agricultural yields)
- Socio-economics and markets:
 - Improvements to carbon project methodologies in order to optimize mangrove management for carbon financing
 - Mapping of socio-economic vulnerabilities to help with spatial planning
 - Disaggregated data by gender and vulnerable groups
 - Impacts of climate change on livelihoods
 - Climate change economic impacts for each sector
- Impacts to key species:
 - Mangrove sedimentation rates
 - Phenology shifts
 - Range shifts – which species are likely to move? Which can adapt in place?
 - Adaptation rates – do adaptation rates match the pace of climate change?
 - Species interactions – as species respond to climate change in different ways and at different rates, how will this impact species interactions and ecosystem functioning?
- Baseline information:
 - Satellite imagery and ground-based hydrogeological data of water resources, including groundwater
 - Water demand
 - Land cover/vegetation
 - Soil hydrology and geomorphology
 - Indian Ocean circulation, tide gauges, wave buoys
 - Research on Madagascar's freshwater wetlands
 - Lack of institutional capacity to conduct research and assessment studies for specific sites for coastal management planning
 - Quantitative calculations on the benefits of forest conservation
- Early warning signs of critical transitions or catastrophic shifts:

- Models and tool development to determine thresholds and tipping points
 - Improved climate and weather forecasting
- Capacity building
 - Capacity building at the grassroots level rather than just higher levels of government.
 - Develop a robust way to deal with climate change in development projects
- Metrics to monitor success and outcomes of projects



Les risques liés aux changements climatiques et les options d'adaptation pour Madagascar

ABSTRACT. Le changement climatique présente une menace croissante pour atteindre les objectifs de développement et est souvent pris en considération dans les plans de développement et les conceptions de projet. Toutefois, certains défis sont survenus dans la mise en oeuvre effective de ces plans, en particulier dans l'engagement durable des communautés à adopter des mesures d'adaptation, mais aussi en raison d'un manque d'information scientifique pour étayer les décisions de la direction. Malgré sa richesse en ressources naturelles et en biodiversité, Madagascar est un pays accablé par une grande pauvreté, l'insécurité alimentaire, une forte croissance démographique et l'exploitation de ses ressources naturelles. Le pays fait face à des défis en termes de développement et d'environnement qui pourraient être intensifiés par le changement climatique. Ce document a pour but de présenter une synthèse des meilleures informations disponibles concernant les impacts du changement climatique sur les intérêts sectoriels à Madagascar. Pour ce faire, nous avons réalisé une analyse des articles récemment publiés et organisé des entretiens formels avec des agences de développement, des organisations non-gouvernementales (ONG) et d'autres parties prenantes. Les risques climatiques à Madagascar comprennent une hausse des températures, des précipitations plus rares et plus variables, des sécheresses plus fréquentes, des cyclones plus intenses et l'élévation du niveau des océans. Nous avons synthétisé les impacts observés et prévus du changement climatique sur les ressources en eau, l'agriculture, la santé humaine, les écosystèmes côtiers, les pêcheries et les écosystèmes terrestres ainsi que sur les services des écosystèmes, et nous évoquons l'adaptation continue au climat et les mesures d'atténuation. Dans la mesure où les défis et les opportunités sectoriels sont liés, une bonne coordination entre les organismes de développement serait bénéfique, car elle permettrait de nouvelles adaptations au climat et des initiatives d'atténuation.

INTRODUCTION

Les impacts du changement climatique sur les îles à l'échelle mondiale sont importants et exacerbés par leurs caractéristiques géophysiques uniques (Nurse et al. 2014). Dans les îles, les secteurs d'activité majeurs, notamment l'agriculture, l'approvisionnement en eau, les pêcheries, les transports, la santé, la biodiversité et le niveau de vie sont interconnectés et extrêmement vulnérables aux menaces liées à la hausse des températures, à l'élévation du niveau de la mer, aux fluctuations des précipitations et aux variations de gravité et de fréquence des événements extrêmes (Nurse et al. 2014, Veron et al. 2019). Certaines îles, comme Madagascar, sont isolées du continent depuis si longtemps qu'elles abritent un grand nombre d'espèces endémiques, ce qui en fait des contributeurs majeurs de la biodiversité locale et mondiale (Myers et al. 2000, Kier et al. 2009). La fragmentation de l'habitat et la déforestation ont influencé la résilience naturelle des écosystèmes insulaires face aux impacts du changement climatique (Hannah et al. 2008). L'intégration de l'adaptation climatique aux plans de développement est nécessaire pour réduire les multiples effets interconnectés du changement climatique entre les secteurs (Nurse et al. 2014). Madagascar est un parfait exemple de la vulnérabilité des îles au changement climatique. Les impacts sur le climat se font ressentir dans de nombreux secteurs très variés. Madagascar est un pays particulièrement riche en ressources naturelles, compte tenu de sa biodiversité endémique à 90 % (Rakotondravony et al. 2018). L'île de Madagascar a perdu une grande partie de son habitat forestier, ce qui augmente la vulnérabilité des populations, de la biodiversité et des services d'écosystème au changement climatique (Hannah et al. 2008). Chesney and Moran et al. (2016) ont développé un modèle de sécurité climatique pour cartographier la vulnérabilité au

changement et les préoccupations en termes de sécurité. Les résultats suggèrent que Madagascar possède des capacités de gouvernance modérées à faibles pour faire face aux défis liés au climat et qu'il s'agit globalement de l'un des pays d'Afrique les plus vulnérables aux effets du changement climatique.

Sur le plan démographique, la population de Madagascar connaît une croissance rapide, estimée à 2,39 % par an (CIA 2020). La population est essentiellement rurale (61 %) et le produit national brut (PNB) par habitant en 2017 était estimé à 1 600 USD (PNUD 2015, CIA 2020). Au niveau économique, trois quarts environ de la population de Madagascar vit sous le seuil national de pauvreté et le pays est confronté à une baisse annuelle de 9 à 10 % du PNB en raison de la dégradation de l'environnement (OMS 2016, Rakotondravony et al. 2018). L'agriculture représente 25 % du PNB et 80 % des emplois (CPGU et BNCCC 2017). Il règne une très forte insécurité alimentaire en raison d'une faible productivité agricole et d'une baisse des revenus, des chocs climatiques récurrents, de l'instabilité politique et de la pauvreté des foyers (Harvey et al. 2014, Rakotondravony et al. 2018). Les éléments de stress agricoles varient d'une région à l'autre en raison des conditions climatiques variables à travers l'île. Par exemple, la sécheresse est un problème majeur au sud de Madagascar, alors que les inondations sont plus préoccupantes dans l'est de l'île (entretiens avec les Services du Secours catholique (SSC) et l'Agence de Développement et de Secours Adventiste (ADRA)). Les événements météorologiques extrêmes sont un responsable majeur de la pauvreté persistante, en particulier dans les zones rurales (CPGU et BNCCC 2017).

En 2010, Madagascar a adopté une politique nationale de lutte contre le changement climatique qui vise à renforcer la résilience

nationale au changement climatique, à réduire la vulnérabilité nationale et à développer des approches en vue de réduire les émissions de carbone (Cochrane et al. 2019). Un plan d'adaptation national (PAN) est en cours de préparation (CPGU et BNCCC 2017, Cochrane et al. 2019). Pour soutenir le développement et la mise en œuvre du PAN, il est nécessaire de baser les décisions de conservation et d'adaptation sur les impacts du changement climatique sur les secteurs liés à la santé humaine et à la biodiversité (Hannah et al. 2008). Un groupe de travail précédent avait évalué les impacts potentiels du changement climatique sur les écosystèmes et le bien-être humain à Madagascar et fait des recommandations portant notamment sur la protection et la restauration de l'environnement, la gestion intégrée des zones côtières et l'intensification et la diversification agricoles (Conservation International et WWF 2008). Il est temps de procéder à une nouvelle évaluation de la littérature pour que les plans d'adaptation reflètent l'état actuel de la science du changement climatique. Pour répondre à ce besoin, l'objectif principal de ce travail est de fournir une synthèse mise à jour des meilleures informations disponibles concernant les tendances documentées et projetées et les impacts du changement climatique sur des secteurs spécifiques à Madagascar et pour fournir des options d'adaptation potentielles. Nous nous concentrons spécifiquement sur l'adaptation (c'est-à-dire la gestion des effets du changement climatique) plutôt que sur l'atténuation (c'est-à-dire la réduction des émissions), même si certaines actions (telles que la réduction de la déforestation) sont importantes à la fois en termes d'adaptation et d'atténuation. Nous examinons la littérature et rapportons sur les discussions en personne et par téléphone avec des parties prenantes clés du gouvernement malgache, de grandes agences internationales de développement et des ONG locales et internationales. L'examen et les entretiens ont porté sur les impacts du changement climatique au niveau national, ainsi que sur ses effets sur six secteurs essentiels : les ressources en eau, l'agriculture, la santé humaine, les écosystèmes côtiers, les pêcheries et les écosystèmes terrestres, ainsi que les services d'écosystèmes.

MÉTHODES

Révision de la littérature Une révision de la littérature a été entreprise en janvier 2020 en utilisant Publish or Perish (Harzing 2007) pour initier des recherches dans Google Scholar. Les années considérées étaient de 2014 à 2020 pour capturer la littérature la plus récente. Les chaînes de recherche suivantes ont été saisies dans le champ « mots clés » et ont retourné le nombre suivant d'articles révisés par des pairs :

- Agriculture : « Madagascar » ET « agriculture » ET (« changement climatique » OU « réchauffement planétaire ») ET (« température » OU « précipitations » OU « sécheresse » OU « élévation du niveau des mers » OU « cyclones » OU « événements météorologiques majeurs »).
- 996 résultats
- Biodiversité : « Madagascar » ET « écosystème » OU (« biodiversité » OU « forêt ») ET (« changement climatique » OU « réchauffement planétaire ») ET (« température » OU « précipitations » OU « sécheresse » OU « élévation du niveau des mers » OU « cyclones » OU « événements météorologiques extrêmes »).
- 550 résultats

- Santé humaine : « Madagascar » ET (« santé » OU (« maladie ») ET (« changement climatique » OU « réchauffement planétaire ») ET (« température » OU « précipitations » OU « sécheresse » OU « élévation du niveau des mers » OU « cyclones » OU « événements météorologiques majeurs »).
- 986 résultats
- Côtes : « Madagascar » ET (« côtes » OU « élévation du niveau des mers » OU « tempête ») ET (« changement climatique » OU « réchauffement planétaire »). 940 résultats
- Ressources en eau : « Madagascar » ET (« Ressources en eau » OU « disponibilité de l'eau » OU « approvisionnement en eau ») ET (« changement climatique » OU « réchauffement planétaire » OU « sécheresse »).
- 999 résultats
- Pêcheries : « Madagascar » ET (« poissons » OU « pêcheries » OU « aquaculture ») ET (« changement climatique » OU « réchauffement planétaire ») ET (« température » OU « précipitations » OU « sécheresse » OU « élévation du niveau des mers » OU « cyclones » OU « événements météorologiques extrêmes »).
- 1000 résultats

Nous avons procédé à une analyse systématique des 100 articles les plus pertinents et des 50 articles les plus cités. Nous avons d'abord lu les titres et des extraits des articles, en excluant les articles qui n'étaient pas liés aux impacts du changement climatique ou aux stratégies de gestion dans la région. Nous avons réalisé des analyses de texte complètes de tous les articles dont le titre et les extraits étaient pertinents (106 articles).

Notre recherche initiale sur la littérature a été menée en anglais, ce qui a pu nous faire manquer certaines recherches pertinentes publiées en français, en malgache ou dans une autre langue. Toutefois, outre notre recherche formelle dans la littérature, nous avons aussi examiné les rapports et les documents de présentation du projet qui nous avaient été envoyés de manière opportune par des groupes de parties prenantes, y compris une analyse en français de la littérature récente sur le changement climatique à Madagascar (Rakotondravony et al. 2018). Cela a abouti à l'inclusion de 19 documents supplémentaires dans la révision.

Discussions avec les parties prenantes

Outre la recherche sur la littérature, l'équipe du projet a passé trois semaines à Madagascar en février-mars 2020, à réaliser des discussions formelles avec les parties prenantes (voir l'Annexe 1 pour la liste des personnes interrogées). Au cours de ces réunions, nous avons abordé les impacts du changement climatique sur les secteurs d'intérêt, les activités actuelles d'adaptation au changement climatique et les lacunes en termes d'informations. L'Annexe 2 contient une liste de questions qui ont été envoyées aux parties prenantes à l'avance afin de guider la discussion. L'équipe a également organisé plusieurs visites de sites de projets d'adaptation en cours.

Synthèse

Nous avons synthétisé de manière qualitative les informations sur les impacts du changement climatique à Madagascar obtenues lors de l'examen de la littérature. Nous discutons des tendances générales et fournissons des exemples pertinents, en notant les domaines d'incertitude dans lesquels des observations et des

projections manquent de clarté ou ne concordent pas. Lorsque cela était pertinent, nous avons utilisé des informations issues des discussions avec les parties prenantes pour compléter notre examen de la littérature, principalement pour fournir des exemples d'activités d'adaptation ou des défis en cours. Dans l'ensemble du texte, nous citons des observations obtenues lors des entretiens comme « (entretien avec nom de l'organisation). »

RÉSULTATS

Climat actuel et changement climatique à Madagascar

Le climat de Madagascar varie dans l'ensemble de l'île (Tadross et al. 2008, Rakotoarison et al. 2018, Raholijao et al. 2019). Sur la côte est, le climat est chaud et humide et les précipitations varient de 1 100 à 3 700 mm par an. La plupart des précipitations surviennent de janvier à avril et la température moyenne annuelle se situe entre 23 et 26 °C. Sur la côte ouest, le climat est tropical et avec des étés chauds et secs. Les précipitations annuelles varient de 1 500 à 400 mm par an du nord au sud le long de la côte ouest. La saison sèche se situe d'avril à octobre, et la température moyenne annuelle varie entre 24 et 27 °C. Le sud-ouest de l'île est semi-aride, avec 500 à 700 mm de précipitations par an. Sur les hauts plateaux centraux, les variations en cours d'année sont importantes en termes de température (16 à 22 °C) et de précipitations (900 à 1 500 mm) ; Rakotondravony et al. 2018). La région du nord et du nord-ouest possède un climat tropical avec une mousson qui augmente les précipitations en été (Rakotoarison et al. 2018, Raholijao et al. 2019).

Tendances en termes de température

Les températures de l'air et des eaux côtières observées ont augmenté à Madagascar (Niang et al. 2015, Cochrane et al. 2019, Raholijao et al. 2019). Les températures maximales de l'air ont augmenté à raison de 0,23 °C par décennie et les températures de la surface de la mer dans l'ouest de l'océan Indien ont augmenté de 0,60 °C entre 1950 et 2009 (Raholijao et al. 2019). Les températures moyennes, maximales et annuelles projetées devraient augmenter dans tous les scénarios d'émission de gaz à effet de serre (Rakotondravony et al. 2018). Dans un scénario d'émissions élevées (parcours de concentration représentatifs, c'est-à-dire RCP 8,5), la température annuelle moyenne devrait augmenter de 4,1 °C d'ici à 2100 (OMS 2016), un chiffre supérieur à celui des estimations précédentes (Tadross et al. 2008). Dans un scénario dans lequel les émissions seraient nettement réduites, voire inversées (RCP 2.6), le réchauffement pourrait être limité à 1,1 °C (OMS 2016).

La tendance au réchauffement de l'océan dure au moins depuis 2005 (IPCC 2019). D'ici 2100, l'océan devrait très probablement se réchauffer de deux à quatre fois plus dans le scénario RCP 2.6 et de cinq à sept fois plus dans le scénario RCP 8.5 par rapport aux changements précédents observés depuis 1970 (IPCC 2019).

Tendances en termes de précipitations

Les pluies annuelles ont diminué sur la plupart des stations météorologiques à Madagascar, même si cette tendance est faible par rapport à la variabilité en cours d'année (Raholijao et al. 2019). Dans la partie ouest de l'île, les précipitations sont devenues plus intenses (Rakotondravony et al. 2018) et des précipitations plus extrêmes sont attendues dans certaines parties de l'île (Chesney et Moran 2016). On prévoit également plus de jours de sécheresse. Dans un scénario de fortes émissions, les périodes de sécheresse les plus longues devraient augmenter d'environ 20 jours

en moyenne d'ici à 2100 (OMS 2016). Les tendances météorologiques locales peuvent aussi être affectées par la déforestation et le changement d'utilisation des terres (Ghulam 2014).

Élévation du niveau des mers

L'élévation du niveau des mers à Madagascar a atteint 1,57 mm par an entre 1993 et 2017 (Raholijao et al. 2019). L'élévation mondiale du niveau des mers devrait être plus importante d'ici la fin de ce siècle dans tous les scénarios, y compris ceux qui sont compatibles avec la réalisation de l'objectif à long terme pour la température défini dans le cadre des Accords de Paris (IPCC 2019). Les prévisions avec un degré de confiance moyen indiquent que le niveau moyen des mers dans le monde augmentera de 0,43 m (0,29 à 0,59 m ; RCP 2.6) à 0,84 m (0,61 à 1,10 m ; RCP 8.5) d'ici 2100 par rapport à la période 1986-2005. L'élévation relative du niveau des mers dépend d'un certain nombre de facteurs. Les variations par rapport à la moyenne mondiale peuvent être supérieures à $\pm 30\%$ dans les régions de déplacement terrestres verticaux rapides, notamment ceux qui sont provoqués par les facteurs anthropogéniques locaux comme l'extraction des eaux souterraines. Le niveau mondial moyen des mers, associé aux marées, aux ondes de tempête et aux vagues extrêmes, a un impact sur les communautés côtières. Ces événements extrêmes deviendront probablement plus fréquents à l'avenir (Oppenheimer et al. 2019).

Cyclones et sécheresse

Madagascar est le pays d'Afrique le plus exposé aux cyclones ; il subit actuellement trois à quatre cyclones par an entre novembre et avril (Rakotoarison et al. 2018). Les régions est, nord-est et ouest sont les plus affectées par les cyclones (Mavume et al. 2010). Comme l'indiquaient déjà les résultats antérieurs (Tadross et al. 2008), l'intensité des cyclones devrait augmenter à l'avenir (Delille 2011, CPGU et BNCCC 2017, Rakotoarison et al. 2018), alors que la fréquence des cyclones tropicaux qui touchent Madagascar devrait augmenter dans les scénarios de hausse des températures de 1 °, 2 ° et 3 °C (Malherbe et al. 2013, Muthige et al. 2018). On a également noté un déplacement vers le sud de la localisation du passage des cyclones, qui devrait se poursuivre (Fitchett and Grab 2014, Cattiaux et al. 2020). Les prévisions au sujet d'une saison des cyclones plus violente et plus imprévisible pourraient rendre l'adaptation des populations locales plus difficile et augmenter les risques de destruction des emplois et des vies (Shultz et al. 2005, Hsiang and Jina 2014). Les sécheresses les plus courantes touchent le sud de Madagascar, mais peuvent aussi se produire sur les hauts plateaux du centre et dans la région de l'est (CPGU et BNCCC 2017, Rakotoarison et al. 2018). Les sécheresses sont devenues plus fréquentes dans la partie sud de l'île (OMS 2016) et ont légèrement augmenté dans les régions nord de Madagascar de 1951 à 2010 (Spinoni et al. 2014). L'évapotranspiration a nettement augmenté sur certaines stations météorologiques entre 1980 et 2010, ce qui, associé à la réduction des pluies, pourrait engendrer une augmentation des conditions de sécheresse (Djaman et al. 2018). La déforestation et la mauvaise utilisation des terres ont exacerbé les dommages causés par les inondations (Rakotondravony et al. 2018).

Impacts du changement climatique sur les zones d'intérêt de l'Agence de développement à Madagascar

Nous fournissons un aperçu des effets du changement climatique sur les ressources en eau, l'agriculture, la santé humaine, les

écosystèmes côtiers, les pêcheries et les écosystèmes terrestres à Madagascar. Pour chaque secteur, nous examinons les effets observés et projetés du changement climatique et discutons des options d'adaptation en cours ou potentielles. Des exemples spécifiques des six secteurs sont présentés dans la Figure 1.

Ressources en eau

Madagascar traverse actuellement l'une des pires crises d'approvisionnement en eau au monde, avec de nombreux défis associés à l'infrastructure de gestion de l'eau (Rakotondravony et al. 2018, Serele et al. 2019). Seuls 27 % des foyers disposent d'eau potable et 45 % des personnes boivent de l'eau non améliorée ou de surface (OMS et UNICEF 2017). 45 % des personnes environ pratiquent la défécation à l'air libre (OMS et UNICEF 2017). En 2018, on estime que 66 % des populations rurales et 49 % des populations urbaines étaient privées d'eau potable (Serele et al. 2019).

En général, les secteurs de l'eau et de l'assainissement se caractérisent par une gestion médiocre de l'eau. Il existe de nombreuses inadéquations en matière de réduction des risques d'inondation, d'exposition à la pollution, de comportement de la population générale, d'affectations budgétaires et d'application des règlements. Les installations d'assainissement sont limitées au périmètre des grandes villes ; bon nombre d'entre elles ont dépassé leur durée de vie prévue et nécessitent des réparations. De nombreux foyers ne disposent pas de l'infrastructure nécessaire pour éliminer les déchets, y compris les excréments ; des dizaines de milliers de mètres cubes de déchets sont déversés dans le réseau urbain sans traitement. Outre une mauvaise qualité de l'eau, cela provoque des maladies générées par l'eau qui sont les principales causes de maladie et de décès. D'autres pressions naturelles et anthropogéniques telles que la déforestation, l'érosion et l'intrusion d'eau de mer exacerbent ces problèmes (García-Ruiz et al. 2017, Rakotondravony et al. 2018). L'érosion et la sédimentation excessive qu'elle engendre peuvent endommager les ponts, les digues d'irrigation et les réservoirs, entraînant d'énormes coûts de maintenance de l'infrastructure (García-Ruiz et al. 2017).

Dans la mesure où la majorité de la population utilise principalement l'eau de surface, l'approvisionnement en eau dépend fortement des précipitations et est sensible à toute perturbation du climat, y compris les baisses prévues des pluies annuelles et l'augmentation de l'évapotranspiration. En outre, l'élévation du niveau des mers pourrait augmenter l'intrusion d'eau de mer dans les eaux souterraines le long de certaines régions côtières. Ces changements risquent d'aggraver le problème de disponibilité de l'eau (Rakotondravony et al. 2018).

Dans la région d'Antananarivo, l'eau de surface pourrait ne plus suffire à répondre aux besoins d'ici 2025, à plus forte raison en 2050 ou 2100 (Rakotondravony et al. 2018). Le sud de Madagascar en général connaît des précipitations irrégulières et un climat aride, avec un accès très médiocre à l'eau pour la consommation domestique et agricole, ce qui en fait l'une des régions du pays les plus exposées à des pressions liées à l'eau (Serele et al. 2019 ; Fig. 1). Pendant la saison sèche, les eaux souterraines (qui constituent la principale source d'eau au sud-ouest de Madagascar) deviennent encore plus limitées, ce qui aboutit à des pratiques d'hygiène extrêmement médiocres et à une

très forte pression sur les points d'eau opérationnels. Cinquante pour cent des habitants du sud de Madagascar, soit environ 1,5 million de personnes, ont eu besoin d'une assistance humanitaire en 2020 (PAM 2020). Le rechargement des nappes phréatiques est fortement influencé par les précipitations et, dans certains cas, dépend fortement des pluies liées à des événements extrêmes (c'est-à-dire les cyclones et les tempêtes tropicales ; Carrière et al. 2021).

Activités d'adaptation au climat sur le terrain et autres opportunités :

Les stratégies possibles d'adaptation au climat peuvent inclure l'organisation et la gestion durable de l'infrastructure d'eau, avec un accès amélioré à l'eau potable (Rakotondravony et al. 2018). Plusieurs organisations s'efforcent d'améliorer la récupération des eaux de pluie ou d'investir dans des points d'eau locaux pour fournir un accès au niveau des communautés. La fourniture d'eau au niveau local pourrait être plus efficace compte tenu des défis actuels pour la gouvernance associés à la gestion de conduites plus grosses (entretien avec l'ADRA). L'Agence des États-Unis pour le développement international (USAID) s'efforce d'améliorer la gouvernance de l'eau, de l'assainissement et de l'hygiène (WASH), de développer des partenariats public-privé pour améliorer la disponibilité et l'assainissement de l'eau et de promouvoir les messages et la sensibilisation aux comportements clés en matière d'assainissement et d'hygiène (entretien USAID WASH). Le développement d'une gestion intégrée des ressources en eau pour les bassins hydrographiques, y compris l'approvisionnement en eau, les inondations et la sécheresse, serait également bienvenu, même si la gestion des besoins immédiats a pris le dessus (entretien USAID WASH).

Agriculture

62 % environ de la population de Madagascar vit en milieu rural et compte principalement sur l'agriculture pour sa sécurité alimentaire et les revenus des foyers (CIA 2020). La faible disponibilité des terres et une capacité d'investissement limitée ont conduit une bonne partie de ces habitants à conserver les pratiques agricoles traditionnelles de culture sur brulis, avec une faible utilisation des ressources agricoles, des pratiques limitées de conservation des sols et une utilisation médiocre de l'infrastructure hydro-agricole (Delille 2011, Harvey et al. 2014, Desbureaux and Damania 2018, Llopis 2018, Rakotondravony et al. 2018). De nombreux agriculteurs exploitent des terres à faible productivité pour cultiver des récoltes alimentaires essentielles comme le riz, le manioc, le maïs et la patate douce (Rakotondravony et al. 2018), et la plupart d'entre eux ne produisent pas suffisamment de riz (une denrée alimentaire de base pour la plupart des Malgaches) pour nourrir leur famille pendant toute l'année (Harvey et al. 2014). Les pressions anthropogéniques sur l'agriculture, telles que la déforestation et l'ensablement, ont dégradé les ressources naturelles, notamment les sols, l'eau et la biodiversité (García-Ruiz et al. 2017, Rakotondravony et al. 2018). Les petits agriculteurs sont particulièrement vulnérables aux chocs climatiques en raison de leur dépendance vis-à-vis d'une agriculture pluviale, de surfaces de culture limitées, d'un niveau élevé de pauvreté, de l'insécurité alimentaire et du manque d'informations et de ressources pour se préparer à faire face aux événements extrêmes (Harvey et al. 2014, Rakotobe et al. 2016).

Les récoltes peuvent répondre de manière positive à des concentrations élevées de CO₂, mais le caractère de plus en plus variable des précipitations, les cyclones plus intenses et la hausse des températures peuvent réduire la production agricole (Lal et al. 2015). Des précipitations trop abondantes peuvent provoquer des maladies des récoltes, alors que des pluies insuffisantes peuvent générer une catastrophe pour les cultures pluviales (Amusan and Odimegwu 2015). Par exemple, on prévoit une diminution de la production de maïs dans de vastes régions de Madagascar en raison d'une baisse des précipitations (Shi and Tao 2014, Ngwakwe 2019). La réduction des précipitations et une saison sèche plus longue devraient diminuer la période de croissance de jusqu'à 50 jours d'ici 2100, en particulier au sud et à l'ouest de Madagascar (Chesney and Moran 2016, Rakotondravony et al. 2018). Dans certaines régions, les agriculteurs ont déjà signalé une réduction de la saison des pluies (Delille 2011). Les sécheresses peuvent également favoriser les invasions de criquets pèlerins qui peuvent s'abattre sur de vastes territoires et détruire des champs entiers, même si ce problème est également impacté par des mesures de contrôle des criquets (Gay-des-Combes et al. 2017). Madagascar devrait également devenir un territoire plus propice aux nuisibles du manioc (Niang et al. 2015).

Les cyclones peuvent détruire des cultures ; les inondations qu'ils génèrent, en particulier dans les zones à forte déforestation, peuvent laisser derrière elles une couche de sable qui rend les terres incultivables (Llopis 2018). Les fortes pluies, y compris celles qui sont associées aux cyclones, intensifient l'appauvrissement des sols en éléments nutritifs, en particulier si les agriculteurs n'utilisent pas de cultures de couverture (Gay-des-Combes et al. 2017).

Après l'agriculture, l'élevage est la deuxième activité la plus importante à Madagascar (Rakotondravony et al. 2018). Le bétail est utilisé pour l'alimentation et comme source d'épargne. Même si les impacts du changement climatique sur la production de bétail restent limités actuellement, les évolutions prévues en termes de température, de quantité et de répartition des précipitations, pourraient avoir des effets directs et indirects sur le bétail (Thornton et al. 2015). Au-dessus de 30 °C, les animaux tendent à moins se nourrir. Les variations des précipitations pourraient nuire à la qualité et à la quantité du fourrage et réduire la capacité d'élevage des exploitations. Les interactions avec d'autres éléments de stress tels que la dégradation des terres d'élevage, la variabilité de l'accès à l'eau et la fragmentation des zones de pâturages pourraient accentuer les effets générés par le climat (Niang et al. 2015).

Activités d'adaptation au climat sur le terrain et autres opportunités :

Diversification des modes de vie et des espèces :

Pour faire face aux conditions changeantes, les agriculteurs pourraient s'adapter en diversifiant leur mode de vie, soit en optant pour des récoltes secondaires, soit en se lançant dans d'autres activités comme la pêche, l'artisanat ou la manutention (Delille 2011). L'utilisation de cultivars de récoltes et de races de bétail résistantes à la sécheresse, aux nuisibles, aux mauvaises herbes et/ou aux inondations pourrait également constituer une approche efficace (Thornton et al. 2015, Zougmore et al. 2018).

Par exemple, les variétés récentes de riz ou de maïs résistantes à la sécheresse et à cycle de récolte court ont permis à certains agriculteurs de bénéficier d'une saison de récolte supplémentaire (Delille 2011). Malgré la promesse de développement de nouvelles variétés de récoltes, des défis inattendus pourraient entraver leur mise en œuvre, notamment l'utilisation imprévue des graines, par ex. la consommation directe des graines (entretien avec le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD)).

Modification des pratiques et des infrastructures agricoles :

Le changement des calendriers d'ensemencement peut permettre d'augmenter les récoltes et les agriculteurs de Madagascar ont déjà déclaré gérer leur calendrier d'ensemencement pour éviter les saisons à risque (Delille 2011, Dawson 2016, Kruger 2016). Dans certaines régions, le changement de date d'ensemencement pourrait ne pas être efficace, car les précipitations sont plus irrégulières et des sécheresses peuvent survenir en milieu de saison (entretien avec le Groupement Semis Direct Madagascar (GSDM)). La mise en place de systèmes d'avertissement précoce qui fournissent des informations sur la date, la durée et la quantité de précipitations serait utile pour aider les agriculteurs à déterminer leur calendrier d'ensemencement et les récoltes à choisir (Asafu-Adjaye 2014). L'agence allemande pour le développement, Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) a ouvert une ligne d'assistance qui fournit un calendrier des plantations agricoles concernant les arachides, les oignons, le riz, le maïs et le gingembre en fonction de la situation géographique de la personne qui appelle (entretien avec le GIZ).

L'amélioration de l'infrastructure d'eau et la promotion de l'irrigation à petite échelle ou à échelle moyenne pourraient aider les agriculteurs à gérer les précipitations variables (Asafu-Adjaye 2014). L'amélioration des stratégies de conservation des sols et des eaux pourrait aussi constituer une approche efficace (Dawson 2016, Desbureaux and Damania 2018, Zougmore et al. 2018). La modernisation de l'infrastructure de production, l'intensification de la production et la fourniture de formations et d'assistance technique pour promouvoir l'adoption de nouvelles techniques ou technologies pourraient aussi aider les agriculteurs à s'adapter (Asafu-Adjaye 2014, Rakotondravony et al. 2018).

L'utilisation de méthodes de fertilisation qui augmentent la teneur des sols en matières organiques, la protection contre l'érosion (par exemple par la reforestation ou les plantations de couverture) ou l'utilisation de paillis ou de compost pourraient être utiles en ce qui concerne la réduction des éléments nutritifs dans les sols (Delille 2011, Gay-des-Combes et al. 2017). Les autres options d'adaptation comprennent l'utilisation de l'agroforesterie et la mise en œuvre d'assurances agricoles pour atténuer les chocs liés au climat (Zougmore et al. 2018).

Agriculture intelligente :

Deux pratiques majeures d'agriculture intelligente adaptée au climat, qui pourraient être efficaces lorsque les récoltes sont principalement limitées par l'humidité des sols, sont l'agriculture de conservation et le système d'intensification du riz (SRI; Corbeels et al. 2014, Lima 2014, Penot et al. 2018). L'agriculture de conservation consiste à maintenir la couverture des sols et à pratiquer la rotation des récoltes. Dans certains cas, elle implique aussi les semis directs ; cela a permis d'améliorer la qualité des

sols et d'augmenter la résistance aux événements climatiques, y compris les précipitations erratiques (entretien dans le village de Kirindy). La préservation des résidus des récoltes grâce à l'agriculture de conservation pourrait aussi être une technique d'adaptation efficace pour le bétail (Thornton et al. 2015). Le système d'intensification du riz utilise des techniques d'amélioration des conditions des sols, de l'eau et des nutriments afin d'augmenter le volume des récoltes sans hausse des coûts (Lima 2014). Le système d'intensification du riz peut augmenter la production de riz de 25 à 100 % et réduire la consommation d'eau de 25 à 50 %. Les agriculteurs déclarent que les récoltes utilisant le système d'intensification du riz sont plus résilientes face aux contraintes liées à l'eau et à la température et supportent mieux les vents forts et les pluies abondantes de tempête (Andrea Mboyerwa 2018).

Accès aux marchés :

Les agriculteurs ont parfois du mal à trouver des acheteurs pour leurs produits, notamment en raison d'intermédiaires qui paient parfois les récoltes à bas prix (entretien dans le village de Kirindy). L'identification et l'élimination des obstacles non-climatiques pour permettre aux agriculteurs d'accéder au marché pourrait faciliter leur adaptation (entretien avec le GIZ). Plusieurs organisations (telles que le GIZ, Conservation International (CI), l'USAID et Prosperer) préconisent les chaînes de valeur des récoltes et l'accès au marché. Par exemple, le programme Prosperer, sous la direction du ministère malgache de l'agriculture, du bétail et des pêcheries, soutient les micro-entreprises afin de créer des liens entre les producteurs ruraux et les opérateurs du secteur privé (entretien avec Prosperer).

Santé humaine

Le manque de soins de santé adéquats et de prévention des maladies, la malnutrition et la pauvreté accroissent la vulnérabilité de nombreux habitants de Madagascar aux effets du changement climatique. La plus grande partie de la population ne dispose pas d'un accès à des services de santé adéquats ; par exemple, 40 % de la population rurale se trouve à plus de cinq kilomètres d'un établissement de santé et ne dispose d'aucun moyen de transport, et les mauvaises conditions météorologiques peuvent compliquer encore l'administration des soins de santé dans les régions isolées. Si les routes deviennent infranchissables à la suite d'intempéries, la fourniture de soins médicaux dans les centres de santé peut être limitée (entretien avec le Centre de Santé de Base (CSB2) de Morondava). De nombreux établissements de santé manquent également de ressources humaines et d'équipements, voire d'électricité et d'eau dans certains cas (entretien avec le CSB2 à Morondava). Les catastrophes naturelles peuvent provoquer des dommages considérables dans le secteur de la santé chaque année et leurs effets se font ressentir longtemps après l'événement. D'une manière générale, le pays manque de ressources pour se préparer correctement, répondre et récupérer après les dommages causés par des événements extrêmes (Rakotoarison et al. 2018).

Les maladies sont la principale cause de morbidité et de mortalité à Madagascar ; bon nombre d'entre elles sont sensibles aux conditions climatiques (Rakotoarison et al. 2018). L'accès aux équipements d'assainissement et à l'approvisionnement en eau est faible, de même que la connaissance des populations rurales concernant les risques liés aux maladies contagieuses,

diarrhéiques et respiratoires aigus. Les épidémies de maladies contagieuses se produisent souvent à la suite d'événements climatiques extrêmes et les maladies liées à l'eau deviennent plus fréquentes lorsque les voies d'eau sont contaminées à la suite d'inondations plus fréquentes et intenses (CPGU et BNCCC 2017, Rakotondravony et al. 2018).

Le changement climatique peut affecter directement la santé à Madagascar. L'augmentation d'événements extrêmes peut réduire la qualité de vie, en particulier pour les habitants qui ne disposent pas d'un habitat adéquat (Davis-Reddy et Vincent 2017). La hausse des températures et les canicules pourraient augmenter la mortalité liée à la chaleur, en particulier parmi les personnes âgées, les jeunes enfants, les malades chroniques et les personnes pauvres. Dans un scénario d'émissions élevées, les décès dus à la chaleur parmi les personnes de 65 ans et plus pourraient augmenter jusqu'à 50 morts/100 000 habitants d'ici 2080, contre la moyenne de 1 mort/100 000 habitants entre 1961 et 1990 (OMS 2016). En outre, les températures élevées peuvent réduire l'efficacité de certains médicaments et vaccins, comme la vitamine A et les tests de la malaria, s'ils ne sont pas stockés dans des réfrigérateurs, ce qui peut représenter un défi pour les centres de santé privés d'électricité (entretien avec le CSB2 de Morondava). Les températures élevées et la sécheresse peuvent aussi provoquer des pénuries d'eau.

La hausse du niveau des océans et les inondations sont des préoccupations supplémentaires. Actuellement, 27 % des habitants vivent dans des zones situées à moins de 100 m d'altitude (Davis-Reddy et Vincent 2017). Faute d'investissements majeurs dans des mesures d'adaptation, plus de 570 000 personnes devraient être touchées par la hausse du niveau des mers entre 2070 et 2100 dans un scénario d'émissions élevées (OMS 2016). Les risques d'inondation dans les terres provoqués par les rivières devraient également augmenter (OMS 2016).

Maladie :

La baisse de la productivité agricole et les événements extrêmes pourraient augmenter l'insécurité alimentaire. Par exemple, les événements extrêmes peuvent réduire la production agricole et interrompre les chaînes d'approvisionnement alimentaires (Rakotoarison et al. 2018). Sans des efforts majeurs d'adaptation, le risque de famine et de malnutrition pourrait augmenter de 20 % d'ici 2050 (OMS 2016) ; cette malnutrition peut entraîner des conséquences à vie sur le développement et la santé (Davis-Reddy et Vincent 2017). De plus, les personnes mal nourries sont plus susceptibles de tomber malades (visite du site de Morondava).

La température, les précipitations et l'humidité peuvent influencer la propagation des maladies en modifiant le cycle de vie et la portée des vecteurs de maladie et en affectant la transmission des maladies communiquées par l'eau et l'alimentation (OMS 2016). La hausse prévue des températures à Madagascar devrait augmenter la transmission des maladies portées par des vecteurs sensibles au climat comme la malaria, la dengue, le chikungunya et la fièvre jaune dans de nombreuses régions (Rakotoarison et al. 2018 ; Fig. 1). La répartition des moustiques vecteurs du virus du Nil occidental et de la filariose lymphatique devrait également augmenter (Samy et al. 2016). Les infections respiratoires aigües, les maladies diarrhéiques, la malnutrition et la malaria (toutes figurant parmi les 10 principales causes de morbidité dans les

cliniques ambulatoires des centres de santé de base) devraient augmenter dans de nombreuses régions.

Le nombre de cas de malaria et de décès liés à cette maladie à Madagascar a augmenté ces dernières années, en raison notamment d'une réduction du budget affecté au contrôle de la malaria et de la détérioration générale de la santé à la suite du coup d'état de 2009. Les changements climatiques à venir pourraient faciliter à la fois l'expansion des moustiques vecteurs de la malaria dans des régions où ils ne sont pas présents actuellement et créer des conditions de températures plus favorables à la transmission sur les hauts plateaux (Caminade et al. 2014, Ryan et al. 2015, Rakotoarison et al. 2018). Dans un scénario de réchauffement à fortes émissions, on estime que 46 millions de personnes à Madagascar seraient exposées au risque de la malaria d'ici 2070. Même si cette hausse est due en partie à la croissance démographique, un scénario à faibles émissions réduit le nombre de personnes à risque d'environ 5 millions (OMS 2016).

Peste :

Madagascar abrite un tiers des cas de peste signalés à travers le monde ; elle survient principalement dans les régions situées à plus de 800 m d'altitude (Kreppel et al. 2014, 2016) La peste est provoquée par la bactérie *Yersinia pestis*, qui est principalement transmise entre des hôtes rongeurs invasifs par les puces. Les êtres humains peuvent être infectés lorsqu'ils entrent en contact avec les puces ou avec des tissus animaux infectés (Kreppel et al. 2014). La plupart des cas de peste surviennent au cours de la saison chaude et humide, de septembre à mars. Les températures plus élevées peuvent influencer le taux de développement à la fois des bactéries et des puces, et les températures plus chaudes alliées à de fortes précipitations ont été associées à une hausse des cas de peste à Madagascar (Kreppel et al. 2014). Toutefois, comme la peste se manifeste principalement dans les régions fraîches d'altitude et est absente dans les zones chaudes et basses, le changement climatique pourrait réduire l'incidence de la peste à mesure que ces zones deviendront trop chaudes (Kreppel et al. 2016).

Activités d'adaptation au climat sur le terrain et autres opportunités :

Quatre régions (Atsimo-Atsinanana, Androy, Anosy et Analanjirofo) se sont avérées fortement vulnérables aux impacts du changement climatique sur la santé (Rakotoarison et al. 2018 ; Fig. 1). Les mesures d'adaptation pourraient inclure l'intégration de la gestion des risques aux activités du système de santé (par ex. l'augmentation de la capacité de réponse aux catastrophes) et le renforcement de la résilience des populations (notamment par une augmentation de la capacité des services de santé de base). Par exemple, les ONG Impact, Mahefa Miaraka et Access s'efforcent d'améliorer l'accès aux services de santé de base comme le traitement de la malaria, le planning familial et la santé de la mère et de l'enfant à Menabe (entretien CSB2 au Centre de santé de Morondava). Dans la mesure où certains villages sont éloignés des centres de santé, des agents de la communauté peuvent fournir les soins de base aux populations et sont formés à traiter la diarrhée, la malaria, les maladies respiratoires et le planning familial (visite du site de Morondava). La réduction de la vulnérabilité au niveau des foyers, y compris l'amélioration du

niveau de vie, l'accès à l'infrastructure de soins de santé et l'amélioration de l'éducation/l'alphabétisation, constitue une mesure d'adaptation importante (Rakotoarison et al. 2018). En ce qui concerne les maladies telles que la malaria, l'augmentation des efforts de contrôle et de la sensibilisation à la maladie pourrait être efficace (Rakotondravony et al. 2018).

Écosystèmes côtiers

Madagascar possède l'un des plus hauts niveaux de biodiversité corallienne de l'océan Indien, abrite la quatrième plus vaste superficie de mangrove d'Afrique et 8 des 60 variétés d'algues marines au monde s'y développent. De nombreux facteurs de stress non liés au climat réduisent la résilience de ces systèmes au changement climatique. Le changement climatique aura aussi des effets indirects sur cet écosystème ; par exemple, les populations de mammifères marins migrateurs depuis l'océan Indien devraient être affectés par le changement climatique pendant leur saison d'alimentation dans les régions polaires (Rakotondravony et al. 2018). Nematchoua et al. (2018) a signalé des observations d'espèces marines en déclin (mollusques, crustacés) lors des activités saisonnières et de la migration. Ces effets, ajoutés aux autres facteurs comme le manque de surveillance et de protection maritime et côtière ; l'accrétion côtière ; l'urbanisation ; la croissance démographique ; la pauvreté ; les structures de gouvernance médiocres ; l'instabilité politique ; et le manque de mesures économiques incitatives en faveur de l'écologie, aboutissent à une vulnérabilité élevée de l'écosystème côtier et marin proche du littoral (Rakotondravony et al. 2018, Cochrane et al. 2019). En outre, l'élévation du niveau des océans aura probablement des impacts redoutables ; une partie des zones littorales de Morondava et Mahajanga, au nord-est de Madagascar, pourrait être submergée d'ici 2100 en raison de la montée du niveau des mers (Rakotondravony et al. 2018).

Mangroves :

Les mangroves fournissent des services importants à l'écosystème, notamment la protection contre les catastrophes naturelles, y compris l'atténuation des vagues pendant les tempêtes et la fourniture de bois de chauffe et de matériaux de construction. L'importance des écosystèmes de mangrove pour la population entraîne une dégradation et une déforestation croissantes et étendues dans l'ensemble de Madagascar, avec une perte nette estimée de 21 % entre 1990 et 2010 (Rakotondrazafy et al. 2014, Benson et al. 2017, García-Ruiz et al. 2017, Rakotondravony et al. 2018). Les études indiquent que d'ici 2100, les dangers climatiques à eux seuls pourraient réduire la couverture de mangrove de 15 %. Les cyclones de forte intensité peuvent détruire complètement les mangroves et affecter les zones environnantes qui ne sont plus en mesure de conserver des populations viables de crevettes et de crabes, ce qui oblige les pêcheurs à s'éloigner davantage vers le large pour pêcher (Rakotondravony et al. 2018). Lors des entretiens organisés dans les villages de pêcheurs, Lemahieu et al. (2018) a signalé une diminution observée des ressources marines et de la mangrove au cours d'une période de 20 ans.

L'exposition des mangroves de Madagascar varie selon la probabilité d'inondations futures à cet endroit, et la sensibilité des espèces individuelles à une augmentation de la salinité, aux inondations, à la sécheresse et à l'envasement est variable. Les régions de mangrove fortement exposées à la montée du niveau

des mers et/ou à l'envasement provenant des terres d'altitude, ainsi qu'aux faibles taux de régénération, sont plus vulnérables que celles dont l'exposition est faible et modérée et où les taux de régénération sont élevés (Clausen et al. 2010). Les mangroves saines, comme celles d'Andranomavo, sont moins vulnérables en raison de la disponibilité de zones de migration potentielles et du taux de régénération élevé. Toutefois, les mangroves dégradées, comme celles de Vahilava, sont particulièrement vulnérables au changement climatique et leur capacité d'adaptation est moindre, avec un taux de régénération quasiment nul (Fig. 1). 70 % environ des mangroves du delta de Tsiribihina présentent une vulnérabilité modérée à élevée, alors que 20% seulement environ des mangroves du delta de Manambolo possèdent une vulnérabilité modérée à élevée (Clausen et al. 2010).

Les récifs coralliens sont très vulnérables en raison de la pression de la pêche et de la croissance démographique, sans oublier l'augmentation de la pollution et une sédimentation excessive en provenance des terres d'altitude (Rakotondrazafy et al. 2014, García-Ruiz et al. 2017, Rakotondravony et al. 2018). Outre ces facteurs de stress indépendants du climat, les récifs coralliens sont fortement vulnérables au changement climatique en raison de l'acidification et du réchauffement des océans ; une combinaison de ces facteurs provoque un blanchissement dans la région de Madagascar (IPCC 2019). L'érosion du littoral et la destruction des récifs coralliens en raison d'une augmentation de l'activité cyclonique représentent des menaces majeures pour les activités de subsistance de nombreuses communautés de pêcheurs (Rakotondravony et al. 2018). Selon l'IPCC (2019), la plupart des récifs coralliens subiront une dégradation, même si le réchauffement planétaire reste inférieur à 2 °C et les autres communautés de récifs coralliens de faible profondeur présenteront des variations en termes de composition et de diversité des espèces par rapport aux récifs actuels. Les épisodes de blanchissement devraient se multiplier, avec un risque de disparition complète des coraux dans l'océan Indien d'ici 20 à 50 ans. Les effets en cascade de la dégradation des récifs coralliens comprennent le déclin des populations de poissons et l'érosion des plages. La dégradation des plages affectera les populations de tortues marines, lesquelles sont déjà menacées par la hausse des températures en raison de l'influence des températures sur le sexe des tortues pendant l'incubation des œufs (Rakotondravony et al. 2018). Le déclin de la santé des récifs coralliens diminuera considérablement les services qu'ils fournissent à la société, tels que la fourniture de nourriture, la protection du littoral et le tourisme (IPCC 2019)

Algues de mer :

Les cyclones peuvent affecter considérablement les lits d'algues de mer (Côté-Laurin et al. 2017). Le cyclone Haruna a détruit la couverture totale d'algues marines de 15,3% à 36,3% en moyenne, en raison du déracinement, de la rupture et de l'étouffement lié à l'ensevelissement et à une réduction de la pénétration de lumière à cause des sédiments en suspension. Cela dit, la réduction de la couverture d'algues de mer qui fournissent nourriture, abri et protection aux poissons n'a pas semblé affecter considérablement les assemblages de poissons à court terme. La résilience des espèces d'algues de mer vis-à-vis des cyclones a été variable. Les populations de trois espèces d'Antsaragnaso (Cymodoceae rotundata, Halophila ovalis et Halodule uninervis) ont

légèrement augmenté après le cyclone. *C. rotundata* et *Thalassodendron ciliatum* ont fait preuve d'une résilience et d'une tolérance élevées (Côté-Laurin et al. 2017).

Activités d'adaptation au climat sur le terrain et autres opportunités :

Les mesures d'adaptation possibles au changement climatique comprennent l'acquisition de terres côtières par les autorités locales, la réhabilitation des secteurs dégradés par la déflexion, le reprofilage de la côte et l'installation de coupe-vent (Rakotondravony et al. 2018). Par exemple, les plantations coupe-vent, comme celle du Filaos résistant à la sécheresse, peuvent contribuer à stabiliser les dunes. L'éducation et la sensibilisation peuvent aussi améliorer le succès des activités de conservation (D'agata et al. 2020). Une certaine adaptation se produit déjà. La zone de protection marine de Nosy Hara est la première région protégée du pays à intégrer le changement climatique à sa gestion, y compris la création de capacité, ce qui aboutit à une évaluation de la vulnérabilité et à la hiérarchisation des mesures de gestion (Rakotondrazafy et al. 2014).

Mangroves :

La restauration des mangroves pourrait être une stratégie d'adaptation efficace. Par exemple, Community Centered Conservation (C3) travaille à la restauration des mangroves, y compris par la création de capacités de soutien de la restauration des mangroves et les activités de gestion. Community Centered Conservation forme également des « ambassadeurs de la conservation » dans la communauté et produit des programmes d'éducation à l'environnement dans les collèges et les lycées (entretien avec C3). Récemment, C3 a commencé à utiliser trois serres au lieu de réaliser des plantations directes, afin que les arbres soient suffisamment grands pour supporter les fortes tempêtes au moment où ils sont plantés. Toutefois, d'autres informations sont nécessaires au sujet des conditions et du moment idéal pour les activités de restauration. L'identification d'espèces de mangrove tolérantes au sel qui sont plus susceptibles de survivre à la hausse du niveau des océans et à la salinisation de l'eau pourrait aussi être une approche efficace (entretien avec l'United States Forestry Service (USFS)).

Récifs coralliens :

Le déclin répandu des coraux des eaux tropicales a donné naissance à des approches de restauration alternatives pour renforcer la résilience climatique, comme le « jardinage des récifs coralliens » et la recherche sur l'évolution assistée, la colonisation et le chimérisme pour la restauration des récifs (IPCC 2019). L'évolution assistée a recours à la manipulation génétique pour renforcer la résilience au changement climatique et à d'autres impacts humains, alors que la colonisation assistée implique le déplacement des espèces loin de leur habitat historique afin d'atténuer la perte de biodiversité ou pour anticiper les changements de l'habitat induits par le climat. Le chimérisme corallien se produit lorsque le corail possède des cellules provenant d'au moins deux individus nés sexuellement de la même espèce. Il s'agit d'une transplantation ou d'une fusion naturelle des tissus (Rinkevich 2019). Toutefois, l'efficacité de ces approches pour augmenter la résilience aux facteurs de stress climatiques est incertaine compte tenu de la tendance actuelle en matière d'émissions de gaz à effet de serre (IPCC 2019).

Pêcheries

Les pêcheries d'eau de mer et d'eau douce fournissent des services précieux aux communautés de Madagascar (Benstead et al. 2003, Cochrane et al. 2019). Les pêcheries marines, y compris la pêche aux crevettes, aux poulpes et aux poissons de récifs coralliens, renforcent les communautés côtières en permettant la subsistance des populations grâce à la nutrition et à la génération de revenus (Cochrane et al. 2019). Par exemple, les pêcheries marines de la région d'Atsinanana constituent une source majeure de protéines et de revenus pour la population côtière et les pêcheurs traditionnels et génèrent environ 125,7 millions d'euros par an (Rakotondravony et al. 2018). Les pêcheries d'eau douce sont également importantes dans certaines régions de Madagascar. Le lac Alaotra abrite la plus grande pêcherie intérieure de Madagascar, et les pêcheries intérieures constituent l'une des deux principales sources de revenus (Lammers et al. 2015). En outre, bon nombre des populations de poissons d'eau douce du pays sont hautement endémiques à Madagascar et contribuent à en faire un lieu à forte biodiversité d'eau douce (Benstead et al. 2003). Les poissons d'eau douce de Madagascar comprennent de nombreux taxons primitifs, très importants pour la conservation car certains fournissent la seule preuve d'évolution dans des groupes apparentés (Benstead et al. 2003).

Les risques climatiques pour les pêcheries d'eau de mer et d'eau douce comprennent l'acidification des océans, les changements des événements cycloniques, l'élévation du niveau des océans, la hausse des températures, l'intensification des vents, l'occurrence croissante d'événements météorologiques extrêmes et la propagation facilitée d'espèces exotiques (Rakotondravony et al. 2018, Cochrane et al. 2019). Les pêcheries pourraient aussi être confrontées à d'autres menaces indirectes liées au changement climatique ; par exemple, les variations des précipitations pourraient provoquer une baisse des récoltes, aboutissant à une augmentation des activités de pêche et à une surpêche entretenue avec le World Wide Fund for Nature (WWF)). Ces menaces affectent la production des pêcheries, la biodiversité marine et d'eau douce, la croissance, la reproduction et la survie des poissons et la conservation des espèces endémiques (Bamford et al. 2017, IPCC 2019). Si l'on ajoute à cela d'autres facteurs de stress anthropogénique (tels que l'introduction d'espèces exotiques, la destruction des zones humides, le défrichement des marécages, la déforestation, la surpêche et l'envasement résultant de l'érosion des sols), les pêcheries et les habitats marins et d'eau douce sont vulnérables et ont besoin d'une attention de conservation et de gestion (Benstead et al. 2003, Bamford et al. 2017).

Les impacts du climat sur les récifs coralliens de Madagascar entraînent des effets en cascade sur les populations des pêcheries marines et sur la production du secteur des pêcheries marines (Cinner et al. 2012). Toutefois, certaines pêcheries marines, comme celle du poulpe, peuvent être résilientes aux impacts du changement climatique (Cochrane et al. 2019). La production des pêcheries intérieures dans les zones humides, le caractère endémique des poissons d'eau douce natifs et l'importance taxonomique sont les principales préoccupations en termes de gestion et de conservation pour le secteur des pêcheries d'eau douce de Madagascar dans un climat changeant (Benstead et al. 2003, Lammers et al. 2015). Les variations des précipitations et de la couverture forestière affectent l'habitat des poissons et

déterminent si le flux sera disponible toute l'année ou s'asséchera pendant certaines saisons (Benstead et al. 2003). L'évolution des tendances d'El Niño, des précipitations et des événements de sécheresse extrême et de cyclones résultant du changement climatique entraîne des conséquences sur le flux des rivières dans les régions insulaires, qui se répercutent sur les pêcheries d'eau douce.

Dans les pêcheries maritimes et côtières, les interactions socio-économiques jouent un rôle important dans l'impact possible du changement climatique sur les communautés de pêcheurs. Les événements météorologiques extrêmes ou imprévisibles réduisent les activités de pêche à la crevette et au crabe, car les pêcheurs limitent leurs activités dans les conditions dangereuses ou peuvent passer de la pêche à la crevette à la capture des crabes, en fonction des conditions (Cochrane et al. 2019). Certains pêcheurs n'ont pas de radio ni de moyen d'être avertis des événements météorologiques extrêmes à l'avance, ce qui constitue un risque pour la sécurité humaine (entretien avec le PNUD). Les vents plus intenses et les vents dominants persistants pourraient modifier les capacités de pêche et entraîner une augmentation de la pêche sur les récifs coralliens et dans les canaux de mangrove et par conséquent, une surpêche et une destruction de l'habitat (entretien avec le WWF). À Ambodivahibe, les pêcheurs ont indiqué que la durée de la saison de pêche a été réduite de trois mois en raison de conditions de vent trop fortes (entretien avec CI ; Fig. 1). Les villageois de Lovobe ont également rapporté que certaines espèces sont désormais introuvables, que les rendements de la pêche ont décliné et qu'ils doivent se déplacer plus loin pour trouver des poissons, mais il est difficile de savoir si cela est dû à la surpêche, à la perte des mangroves ou au changement climatique (entretien à Lovobe).

Activités d'adaptation au climat sur le terrain et autres opportunités :

Les activités décrites dans la section consacrée au littoral, comme la restauration de la mangrove et du récif côtier, sont des stratégies d'adaptation importantes pour les pêcheries. D'autres solutions consisteraient à promouvoir des modes de subsistance alternatifs et à établir des chaînes de valeur. L'accès aux marchés, la présence d'intermédiaires dans les villages et des niveaux d'éducation plus élevés pourraient augmenter la capacité d'adaptation des communautés de pêcheurs (D'agata et al. 2020). À Ambodivahibe, Conservation International assure la promotion de modes de vie alternatifs comme l'élevage des chèvres et l'apiculture. Cet organisme travaille aussi à la restauration des mangroves et à la plantation d'arbres à proximité des villages afin de les protéger des cyclones (entretien avec CI). Dans le sud, le PNUD s'efforce d'établir des chaînes de valeur en mettant les pêcheurs en relation avec des acheteurs (entretien avec le PNUD).

Écosystèmes terrestres et services d'écosystème

90 % environ des espèces de Madagascar sont endémiques, et bon nombre d'entre elles sont menacées d'extinction en raison de la perte et de la fragmentation de leur habitat, de l'expansion agricole, de l'arrivée d'espèces invasives, de la surexploitation et du changement climatique (Ganzhorn et al. 2001, Vieites et al. 2009, IUCN 2018). Depuis plus d'un siècle, la déforestation constitue une menace majeure pour la biodiversité ; 44 % de la forêt naturelle a été perdue entre 1953 et 2014 (Rakotondravony

et al. 2018, Vieilledent et al. 2018), principalement en raison de l'agriculture sur brûlis pour la subsistance et la production de charbon de bois, ainsi que l'élimination illégale d'arbres de valeur comme le palissandre (Waeber et al. 2015). À ce rythme, la perte de l'habitat menacera la persistance de nombreuses espèces endémiques (Morelli et al. 2020).

Malgré le quadruplement impressionnant de la taille des zones protégées à Madagascar depuis 2003 (Kremen et al. 2008), des problèmes majeurs persistent et dans certains cas augmentent, notamment le manque de gestion efficace, de mesures incitant les communautés à participer à la gestion, de financement stable, d'application de la loi et de gestion scientifique des ressources (Gardner et al. 2018).

Les études ont démontré que plus de 100 espèces malgaches sont vulnérables au changement climatique (Pacifi et al. 2015). Busch et al. (2012) a prédit que de nombreuses espèces se déplaceraient vers le sud ou vers des régions d'altitude afin de suivre les conditions climatiques ou d'échapper à la réduction des zones de nourriture. La taille des forêts humides de l'est devrait diminuer d'ici 2080, alors que les forêts sèches de l'ouest pourraient se déplacer vers l'est (Rakotondravony et al. 2018). Dans le massif de Tsaratanana, point culminant de Madagascar, les reptiles et les amphibiens montent vers les zones plus élevées (Niang et al. 2015). Une étude récente a projeté les futures distributions spatiales de 57 espèces à Madagascar, et a projeté que 27 espèces auraient des distributions de moins de 50 % de leur aire de répartition actuelle ; 14 espèces auraient des distributions inférieures à 20 % de leur aire de répartition ; et 6 espèces auraient des distributions inférieures à 1 % de leur aire de répartition actuelle. La disparition de 3 espèces est projetée (Brown et Yoder 2015). Il est important de noter que la plupart de ces espèces manquent d'habitat convenable pour relier leur habitat actuel à un futur habitat convenable (Brown et Yoder 2015).

L'évolution des températures et des précipitations peut aussi modifier la phénologie ; les plantes habitant les plateaux et les forêts sèches pourraient être particulièrement vulnérables à la variabilité croissante des précipitations (Rakotondravony et al. 2018). Une préoccupation supplémentaire concerne les incohérences phénologiques provoquées par les espèces qui s'adaptent différemment au changement climatique affecteront les communautés et les fonctions écologiques (Morellato et al. 2016). La reproduction de nombreuses espèces de lémuriens a évolué pour suivre la disponibilité des ressources alimentaires ; si les plantes des forêts sèches modifient leur phénologie en réponse au déficit en eau et que le lémur à queue annelée (*Lemur catta*) et le sifaka de Verreaux (*Propithecus verreauxi*) ne le font pas, la population de ces espèces pourraient connaître un déclin (Rakotondravony et al. 2018).

Une augmentation du nombre, de l'intensité ou de la durée des événements extrêmes pourrait affecter la biodiversité de Madagascar. Par exemple, la sécheresse peut réduire la survie des espèces végétales et ainsi, la productivité (Rakotondravony et al. 2018). Il est aussi possible que la productivité des plantes augmente grâce à la fertilisation apportée par le CO₂ (Lawal et al. 2019). Les événements extrêmes peuvent également affecter indirectement les écosystèmes. Par exemple, les populations pourraient être en mesure d'utiliser de nouvelles ouvertures dans la forêt pour atteindre de nouvelles zones forestières qui étaient

auparavant inaccessibles (Waeber et al. 2015). La destruction de l'habitat à la suite d'événements extrêmes peut aussi accélérer la propagation des espèces invasives (Rakotondravony et al. 2018).

Le changement climatique devrait exacerber d'autres menaces anthropogéniques pour les écosystèmes terrestres de Madagascar. La déforestation est aggravée par les événements climatiques extrêmes ; par exemple, la région de Menabe a perdu plus de 60 % de sa couverture forestière au cours des 10 dernières années, tandis que les habitants immigraient pour échapper à la sécheresse du sud (entretien USAID Mikajy/Hay Tao, entretien avec le WWF). Une étude récente projetait que l'habitat adéquat pour deux espèces de varis (*Varecia variegata* et *V. rubra*) déclinera de 62 % dans un scénario sans nouvelle déforestation dans les zones protégées, et de 81 % si la déforestation des zones protégées se poursuit (Morelli et al. 2020). Le changement climatique pourrait aussi affecter indirectement les populations de lémuriens ; si le changement climatique aggrave l'insécurité alimentaire, les populations pourraient recourir davantage à la chasse d'animaux sauvages tels que les lémurs (Borgerson et al. 2016)

Activités d'adaptation au climat sur le terrain et autres opportunités :

Les écosystèmes qui sont déjà dégradés par des facteurs de stress non liés au climat sont moins résilients au changement climatique. En conséquence, l'application renforcée des règles du respect des zones protégées, la préservation de l'intégrité des forêts, la promotion de la restauration de nouveaux habitats et la gestion des causes sous-jacentes de la déforestation sont des stratégies d'adaptation essentielles pour Madagascar (Busch et al. 2012, Morelli et al. 2020). La prévention de la perte et de la dégradation des forêts est moins coûteuse et plus efficace que la restauration des forêts une fois qu'elles ont été détruites, même si une reforestation sera sans doute nécessaire pour préserver certaines espèces (Busch et al. 2012). La protection de couloirs pour permettre aux espèces de changer leur répartition en fonction du changement climatique sera particulièrement importante (Kremen et al. 2008, Busch et al. 2012).

Plusieurs organisations travaillent à la reforestation. Le fait que de nombreuses organisations plantent des espèces invasives plutôt que des arbres locaux constituent un sujet de préoccupation. Même si les arbres comme l'eucalyptus et le pin poussent rapidement et apportent des bénéfices rapides en termes de carburant et de stabilisation des sols, ils peuvent avoir des conséquences écologiques négatives (Baohanta et al. 2012, Ferreira et al. 2019). En conséquence, dans la mesure du possible, des graines récoltées de manière durables sur des arbres endémiques locaux devraient être utilisées dans les efforts de reforestation. L'acacia est une option utilisée par certains projets de reforestation, (par ex. entretien avec le PNUD, entretien de Tany Meva). Ny Tanantsika travaille avec des communautés pour collecter et planter des graines d'espèces d'arbres natives (entretien avec Ny Tanantsika). Conservation International plante des variétés locales dans des zones protégées essentielles, mais collabore avec les communautés sur l'agroforesterie dans les zones tampon (entretien CI). Toutefois, le changement des comportements et des préférences en termes d'espèces dans les communautés peut être difficile et empêcher l'adoption de ces règles (visite de la commune d'Ambalavao). En conséquence, d'autres efforts seront nécessaires pour faire comprendre les avantages des espèces natives aux populations locales.

Bon nombre d'organisations travaillent aussi à la promotion de la création de capacités et de modes de subsistance durables, tels que des pratiques agricoles plus durables, l'agroforesterie/// et les chaînes de valeur sous-jacentes (par ex. Tany Meva, Wildlife Conservation Society (WCS), USAID Mikajy) ou le planning familial (par ex. WCS) afin de réduire la pression sur la déforestation. L'acquisition de terres est une autre stratégie qui pourrait réduire l'envahissement des zones protégées, car cela pourrait inciter les agriculteurs à investir dans leurs terres au lieu de se tourner vers la forêt (entretien avec USAID Strengthening Entrepreneurship and Enterprise Development (SEED)).

DISCUSSION

Le changement climatique affectera de plus en plus certains secteurs importants à Madagascar, notamment les ressources en eau, l'agriculture, les écosystèmes littoraux et terrestres, les pêcheries et la santé humaine. Nous avons documenté des effets du changement climatique observés et potentiels et des mesures d'adaptation potentielles (Tableau 1).

Tous les secteurs inclus dans cette analyse sont connectés ; les changements ne se produisent pas de façon isolée (Fig. 2). Par exemple, le manque d'infrastructure de distribution d'eau peut exacerber les impacts sur la sécheresse. Les sécheresses et le déclin agricole qu'elles entraînent peut augmenter l'insécurité alimentaire et finalement, aboutir à la malnutrition et à une baisse générale de la santé (Rakotoarison et al. 2018). Le déclin de l'agriculture peut aussi provoquer une augmentation de la déforestation, tandis que les agriculteurs développent leurs zones de cultures pour compenser le rendement faible des récoltes (Desbureaux et Damania 2018). De même, une production agricole réduite pourrait augmenter les activités de pêche et aboutir à une surpêche (entretien avec le WWF). Une analyse préliminaire indique une hausse significative des admissions dans les centres de santé un an après une sécheresse sévère, ce qui illustre la complexité de la relation entre la production d'eau et de nourriture et la santé humaine (Carrière et al. 2021). La fréquence croissante des épisodes de sécheresse au sud de Madagascar constitue un défi pour les programmes de développement. Dans le passé, les organisations savaient quand l'aide alimentaire serait la plus nécessaire, mais les changements récents dans la fréquence des sécheresses rendent désormais cette prévision difficile (entretien CRS). Les appels à l'assistance étrangère contre les catastrophes pourraient être plus fréquents à l'avenir. Continuer à fournir une assistance humanitaire sans réduire les causes sous-jacentes de la vulnérabilité ne sera pas une stratégie efficace dans le futur (entretien CRS/ADRA).

La protection des écosystèmes de Madagascar demeure une stratégie importante pour promouvoir la capacité d'adaptation et le bien-être humain (CI et WWF, 2008). La crise de la biodiversité à Madagascar affecte plus que la flore et la faune du pays. Les forêts offrent des services d'écosystème essentiels pour près de 90 % des Malgaches qui subsistent grâce aux produits naturels, tels que le charbon de bois, les fruits, les pâturages pour le bétail et les plantes médicinales (Waeber et al. 2015, Dave et al. 2017, Neudert et al. 2017, GIZ 2020). La déforestation peut également augmenter les inondations et l'envasement associés aux cyclones, ce qui entraîne des conséquences pour le rendement agricole et la sécurité alimentaire (Llopis 2018). Par exemple, en 2012, le cyclone Giovanna a provoqué une perte majeure de

récoltes qui a augmenté l'insécurité alimentaire pour les fermiers (Rakotobe et al. 2016). En outre, la perte des écosystèmes et de la biodiversité de Madagascar peut diminuer les bénéfices économiques liés au tourisme et aux activités connexes, même si dans certains cas, les bénéfices de l'écotourisme ne compensent pas les coûts de la protection des forêts aux niveaux local et régional (Busch et al. 2012, Neudert et al. 2017).

La restauration des écosystèmes dégradés est plus coûteuse et moins efficace que la protection des écosystèmes intacts (Busch et al. 2012). L'investissement dans des réchauds plus efficaces ou des sources d'énergie alternatives pourrait réduire la dépendance vis-à-vis du charbon de bois, réduisant ainsi la déforestation tout en augmentant les opportunités économiques (GIZ 2020). Par exemple, le WWF a mis en œuvre un projet d'énergies renouvelables, dans le cadre duquel il a formé des femmes dans les régions rurales à l'installation et à l'entretien de systèmes d'énergie solaire dans leurs villages (entretien avec le WWF). L'installation de panneaux solaires dans les zones rurales pourrait aussi améliorer les services de santé dans les établissements qui manquent d'électricité (Visite du centre de santé de Marofandilia CSB2).

Même si le travail direct sur la biodiversité et la conservation des forêts est indispensable, la plupart des organisations que nous avons interrogées se sont écartées des activités de conservation directe pour mettre en œuvre des projets qui renforcent les communautés locales (entretien avec le WWF, entretien avec l'USAID). Par exemple, de nombreuses entreprises travaillent à l'amélioration des pratiques agricoles, dans l'espoir que cela réduira l'empiètement sur les zones protégées. Toutefois, l'adoption et l'utilisation durable de nouvelles pratiques est un défi, en particulier lorsqu'elles impliquent l'investissement dans des outils ou des équipements agricoles. Ainsi, même si les bénéfices de l'agriculture de conservation s'accumulent au fil du temps, les réponses initiales des récoltes peuvent être légères ou extrêmement variables et les agriculteurs peuvent ne pas en tirer de bénéfices immédiats (Corbeels et al. 2014). Il s'agit d'une contrainte importante pour les fermiers pauvres en ressources, et même lorsque les agriculteurs adoptent ces techniques, ils risquent de ne pas les poursuivre une fois que le financement à court terme du projet aura pris fin (Lima, 2014). En conséquence, il est nécessaire de nouer des partenariats à plus long terme avec les agriculteurs (Penot et al. 2018). Une enquête récente auprès des fermiers de la région du lac Alaotra a révélé que même si les agriculteurs signalaient des rendements en hausse et plus stables avec l'utilisation de l'agriculture de conservation, 39 % d'entre eux avaient cessé d'utiliser cette technique, en citant un certain nombre de facteurs sociaux, économiques et techniques (Penot et al. 2018). Le Groupement Semis Direct Madagascar a constaté que les techniques qui produisent des résultats positifs pour les fermiers, telles que le compostage, sont plus susceptibles d'être utilisées au-delà de la fin du projet (entretien avec le GSDM).

À long terme, le traitement des aspects clés de la vulnérabilité, comme l'amélioration de l'éducation et de la santé et la réduction de la pauvreté, aidera les populations à s'adapter au changement climatique (Asafu-Adjaye 2014). La formation et le renforcement de la sensibilisation est une stratégie générale qui est importante pour promouvoir la capacité d'adaptation à Madagascar (D'agata et al. 2020). De nombreuses entreprises s'efforcent

d'améliorer les connaissances de la communauté en matière de santé (par ex. assainissement, vaccins, hygiène), de pratiques agricoles efficaces et de bénéfices de la préservation de l'environnement. Il est possible d'exploiter l'infrastructure éducative existante pour soutenir de nombreux objectifs de développement simultanément. Par exemple, les agents de santé communautaires et les centres de santé qui travaillent déjà avec les populations pour promouvoir les comportements sains pourraient aussi fournir des informations au sujet des avantages de la durabilité environnementale.

Les organisations de développement sont confrontées à un défi : elles ne peuvent travailler qu'avec un sous-ensemble de communautés et les ressources du gouvernement sont limitées lorsqu'il s'agit de faire respecter l'intégrité des forêts, ce qui complique le contrôle de la déforestation. En outre, aucune des organisations que nous avons interrogées n'a évalué le succès de ces informations jusqu'à présent. En fait, nous manquons de preuves indiquant que la gestion des ressources d'extraction au niveau des communautés favorise la conservation de la biodiversité dans le contexte mondial du développement terrestre, et ce succès dépend du contexte (Sayer et al. 2017, Gardner et al. 2018). Le développement de la capacité des organismes gouvernementaux et des autorités locales à gérer de façon durable les zones protégées et de développer un système de surveillance pour suivre les progrès pourrait améliorer l'efficacité des projets (entretien avec le WWF).

Même si notre compréhension du changement climatique à Madagascar s'est améliorée depuis quelques années, il subsiste des incertitudes et des lacunes de connaissances qui compliquent la tâche des organisations de développement qui s'efforcent d'intégrer la résilience climatique aux projets de développement (Annexe 3). Dans certaines régions, nous manquons de données de base concernant le climat et la météorologie, ce qui rend difficile l'élaboration de projections affinées concernant les zones à risque d'inondation, de sécheresse, d'élévation du niveau des mers et de cyclones. Même lorsque ces données existent, nous avons besoin d'une meilleure traduction et communication des informations et de leurs utilisations. Outre les informations de base sur le climat, il y a un manque de modélisation des impacts du changement climatique à l'échelle locale. Par exemple, quel sera l'impact du changement climatique sur le rendement agricole des récoltes importantes dans différentes régions de l'île ? Au niveau écologique, il reste quelques incertitudes concernant la manière dont les espèces et les écosystèmes spécifiques réagiront au changement climatique. L'une de ces incertitudes tient au fait que même si on s'attend généralement à ce que les espèces changent de territoire en fonction de leurs préférences en termes de température et de précipitations, il est difficile de prédire quelles espèces se déplaceront les premières et dans quelle mesure. De plus, les espèces peuvent réagir différemment au changement climatique, ce qui pourrait impacter les interactions entre les espèces et d'autres fonctions de l'écosystème. Enfin, un travail supplémentaire est nécessaire concernant la manière dont les impacts du changement climatique pourraient affecter les communautés humaines. À ce titre, la cartographie de la vulnérabilité socio-économique au changement climatique pourrait favoriser la planification des espaces. Des informations concernant les impacts et les changements économiques sur le mode de vie seraient également utiles, en particulier en ce qui

concerne les activités de subsistance qui pourraient être les plus résilientes au changement climatique dans différents sites. Les outils tels que la planification de scénarios (Cobb et Thompson 2012) et la prise de décision structurée (Gregory et al. 2012) pourraient aider les organisations à développer des plans de projets tenant compte de cette incertitude.

Bien que les liens entre les secteurs soient complexes et que des incertitudes subsistent, il existe une opportunité pour le gouvernement de Madagascar, les organismes de développement, les ONG et le secteur privé de lever des fonds et de travailler entre secteurs pour relever les défis (Fig. 2). Par exemple, la réduction de la déforestation limiterait l'érosion, ce qui pourrait augmenter la productivité agricole et la santé humaine et réduirait aussi l'envasement qui dégrade les écosystèmes littoraux. Ces avantages fourniraient aux populations des opportunités économiques accrues, ce qui augmenterait la résilience des communautés aux chocs climatiques.

CONCLUSIONS

Le changement climatique affecte déjà et continuera à affecter des secteurs d'activité importants à Madagascar. Des facteurs de stress climatiques et non-climatiques interagissent et peuvent exacerber les conséquences négatives, de sorte que le fait de traiter les vulnérabilités sous-jacentes telles que le taux de pauvreté élevé, l'insécurité alimentaire et la croissance démographique pourrait réduire les impacts négatifs. Alors que les organisations de développement conçoivent de nouveaux projets, l'exploitation de l'expertise, des fonds et des activités dans d'autres secteurs serait bénéfique car les défis et les opportunités sectoriels sont liés. En outre, une coordination accrue entre le gouvernement de Madagascar, les organismes de développement, les ONG et le secteur privé pour promouvoir des activités d'adaptation plus durables et adaptées au climat aidera Madagascar à se préparer et à répondre à ce défi émergent.