

Mise en place d'un système de surveillance des eaux souterraines dans le Grand Sud de Madagascar

Pascale Fara Rakotomandrindra¹, Tsitola Benahy Ramananjato², Felaniaina Rakotondrabe³, Mougabe Koslengar³, Thomas Health², Simon Damien Carriere⁴.

¹ Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

² Action Contre la Faim (ACF), EAH

³ United Nations Children's Fund (UNICEF), EAH

⁴ Sorbonne Université, UMR 7619 METIS

Résumé- Le Grand Sud de Madagascar est une zone semi-aride où une crise humanitaire chronique due à la sécheresse dévaste la population et l'économie de la zone surtout ces deux dernières décennies. La recherche d'une issue à cette crise semble très difficile à cause de manque de données sur la disponibilité des ressources en eau pour une prise de décision. D'où la mise en place de 34 sites d'observation des niveaux d'eau dans les forages de cette région par ACF et UNICEF en collaboration avec le MEAH, la DGM et l'IOGA. Ces données contribueront à la mise en place du Système d'Alerte Précoce (SAP) pour aider les décideurs dans leur prise de décision afin de réduire les dégâts causés par la sécheresse.

Mots clés : Grand Sud de Madagascar, Système d'Alerte Précoce, Eaux souterraines, Forages, Changement Climatique.

I. Introduction

Des résultats de recherches effectuées dans le monde entier depuis la deuxième moitié du XXème siècle ont montré et mis en évidence des changements globaux du climat. Ces changements se manifestent tout d'abord par la hausse des températures moyennes, des modifications des régimes de précipitation et l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes (Dai, 2013). Les ressources en eaux souterraines sont impactées par les changements climatiques (Taylor et al., 2013a). Dans de nombreuses régions du monde, la hausse des températures combinées à la baisse des précipitations mène à une diminution de la recharge qui induit une diminution des stocks d'eau souterraine. Ce constat est particulièrement vrai en Afrique. Cependant, c'est aussi en Afrique que l'on constate une forte variabilité interannuelle de la recharge (Taylor et al., 2013b). Nous avons besoin de réaliser des suivis piézométriques en long terme pour démêler les effets long terme liés aux changements climatiques de ceux liés à la variabilité interannuelle du climat et ainsi mieux comprendre l'évolution et le devenir des eaux souterraines (Cuthbert et al., 2019 ; Kolusu et al., 2019).

A Madagascar, le Grand Sud est une zone où l'eau souterraine est critique pour les populations puisque c'est la seule ressource d'eau disponible pendant une longue période de l'année. L'eau souterraine est la plus sûre source d'eau potable comme dans de nombreuses zones d'Afrique Subsaharienne (Taylor et al., 2019). Depuis 1950, la température a augmenté de plus d'un degré Celsius dans le Grand Sud (Tadross et al. 2008 ; The World Bank, 2021). Ce phénomène provoque ainsi des sécheresses chroniques (« le kéré ») qui ont de lourdes répercussions sur les populations (ONU, 2021). La sécheresse agit sur les populations via deux effets : i) l'anéantissement des récoltes ; ii) la limitation de la recharge des eaux souterraines qui contraint l'accès à l'eau. Les niveaux des eaux souterraines ne sont pas simplement liés aux

précipitations de l'année en cours car ces masses d'eau jouent un rôle tampon. Ainsi, Cuthbert et al. (2019) ont montré qu'il peut y avoir des cycles de recharge et décharge de plusieurs années sur plusieurs aquifères en Afrique.

Il est donc indispensable de mettre en place des suivis piézométriques à long terme pour mieux comprendre la dynamique des nappes d'eaux souterraines et anticiper les pénuries d'eau qui affectent le Grand Sud de Madagascar. Depuis 2014, l'ONG Action Contre la Faim (ACF) a lancé un premier suivi piézométrique long terme dans le cadre de l'observatoire GROSoM (Carrière et al. 2021). Ces efforts ont été poursuivis en 2019 par UNICEF (United Nations Children's Fund) qui a également implanté un réseau de suivi piézométrique.

Cet article retrace la mise en place d'un réseau d'observation piézométrique GROSoM dans le Grand Sud de Madagascar. Nous relèverons et discuterons les défis rencontrés par les différents acteurs qui ont mis en place ce réseau. Nous présentons les résultats obtenus après 8 ans de suivi menés grâce aux efforts combinés par l'Agence du système des Nations Unies représenté par l'UNICEF et l'ONG ACF et des institutions locales Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (IOGA), Direction Régionale de l'Eau, Assainissement et Hygiène (DREAH), Autorité Nationale De l'Eau et de l'Assainissement (ANDEA), Direction Générale de la Météorologie (DGM)). Enfin, nous suggérons des pistes de solution pour faire perdurer cet observatoire dans les prochaines années.

II. Matériels et méthode

II.1 Zone d'étude

Le Grand Sud qui fait l'objet de la présente étude se situe entre les coordonnées géographiques 23°12' et 25°36' de latitude Sud et 43°36' et 47°36' de longitude Est. Il s'étend sur une superficie d'environ 49 398 km² soit 8,20% de la superficie totale de Madagascar. Il est situé entièrement au Sud du Tropique du Capricorne. Sur le plan administratif, le Grand Sud est formé de trois Régions à savoir les Régions Atsimo Andrefana, Anosy et Androy. Les Districts touchés par l'étude sont Betioky, Ampanihy, Beloha, Tsihombe, Bekily, Amboasary et Taolagnaro.

Du point de vue climatique, le Grand Sud est dominé par un climat semi-aride où les précipitations varient entre 400 à 600 mm (Rabemanana, 2002, Rakoto, 2003). Au sein de cette vaste zone semi-aride, on rencontre un gradient pluviométrique et les zones les plus sèches se trouvent vers le Sud-Ouest. Quelques kilomètres à l'Est du District Amboasary, le District Taolagnaro se trouve sous une influence climatique humide et reçoit une bonne quantité de précipitations annuelles allant jusqu'à 2400 mm par an.

II.2 Géologie et hydrogéologie

On rencontre une grande diversité de formations géologiques dans le Grand Sud. En partant du Nord-Est les formations plutoniques du Précambrien forment le « socle cristallin » (Fig. 1). Ces formations donnent des aquifères de socle typique développés dans la zone d'altération (Lachassagne et al. 2011).

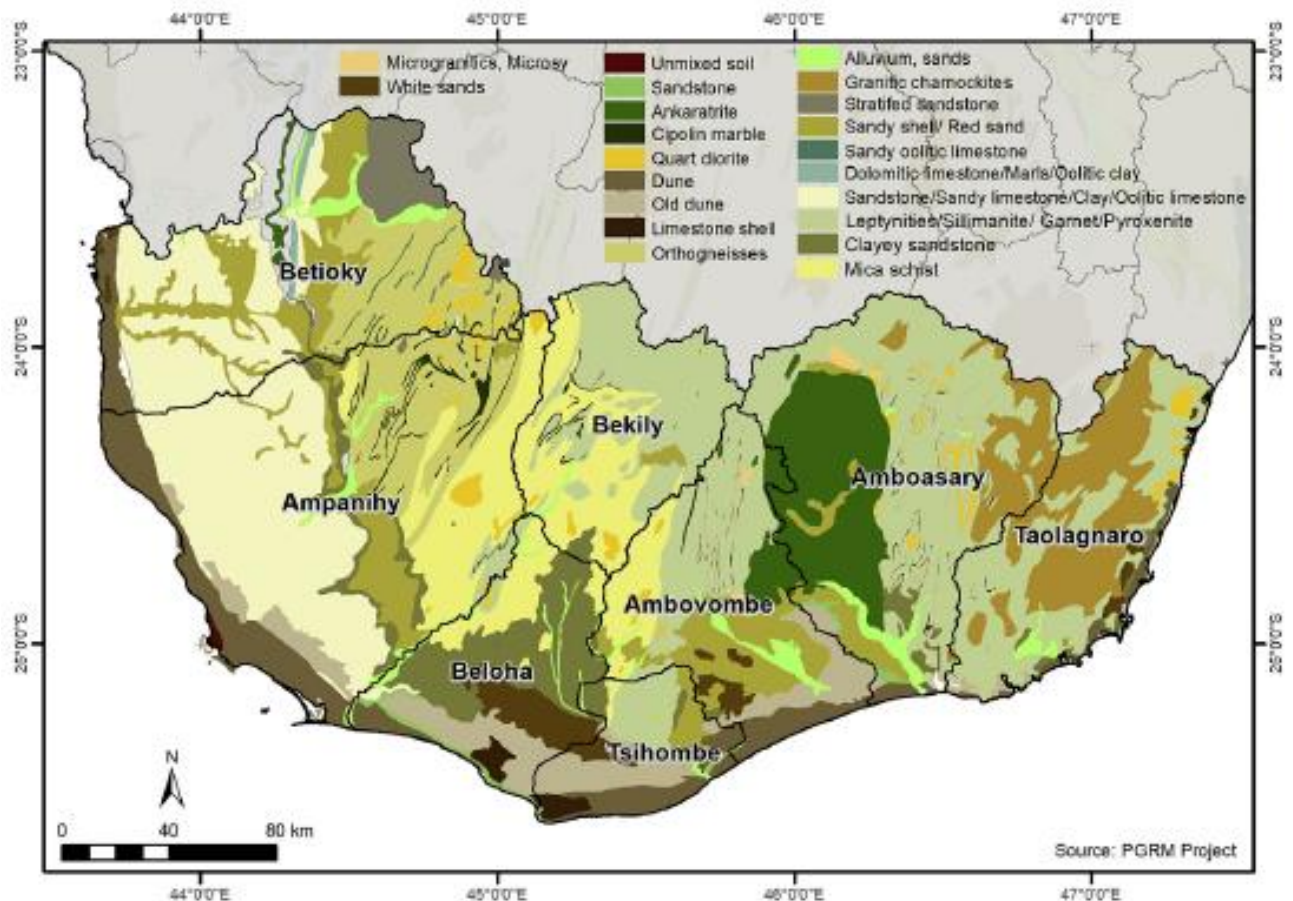


Figure 1: Carte géologique du Grand Sud de Madagascar (*PGRM, 2008 modifié par Serele et al., 2019*)

En allant vers le Sud-Ouest, on rencontre les formations sédimentaires de l'ère Primaire et Secondaire également appelées « socle sédimentaire ». Cet ensemble sédimentaire ancien présente une épaisseur de plusieurs milliers de mètres (Guyot, 2002). On y trouve une grande variété de roches (e.g. schistes, grès, conglomérats, argiles) qui impliquent une grande variété de contextes hydrogéologiques. A l'Est, les formations sédimentaires récentes du plateau Mahafaly viennent recouvrir le socle sédimentaire.

Cet ensemble est fortement marqué par les formations carbonées de l'Eocène d'une épaisseur de 600m qui permis le développement d'un vaste hydrosystème karstiques. On retrouve les formations de Néogène continental et Quaternaire qui viennent parfois recouvrir les formations Eocènes et une partie du socle sédimentaire. Les massifs du volcan d'Androy se sont mis en place il y a environ 65 Ma et forment des aquifères volcaniques (Rabemanana, 2002, Rakoto, 2003, Garo, 2012).

D'un point de vue hydrologique, la région est traversée par d'innombrables cours d'eau mais seulement 3 fleuves sont permanents (l'Onilahy, le Mandrare, la Menarandra). Ces conditions placent les eaux souterraines au cœur des questions d'approvisionnement en eau potable car c'est la seule ressource que les populations peuvent exploiter toute l'année. Généralement, on rencontre trois types d'aquifères dans le Grand Sud : i) les aquifères du socle précambrien ; ii)

les aquifères sédimentaires consolidés qui sont dominés par le flux de fracture ; iii) les aquifères sédimentaires non consolidés (ONU.,1989 ; Rakotondrainibe, 2006).

II.3 Méthodologie de suivi des eaux souterraines

La méthodologie de suivi des eaux souterraines est organisée en cinq grandes étapes :

- le choix des sites au regard de leur pertinence scientifique (représentativité d'un système hydrogéologique) et des aspects pratiques (sécurité du matériel, accessibilité de la zone),
- les réunions communautaires pour sensibiliser les populations locales au travail de suivi piézométrique,
- l'installation des sondes à enregistreurs automatiques,
- la formation des techniciens qui vont collecter les données avec les sondes manuelles,
- la validation et le traitement des données à travers des techniques et logiciels appropriés.

II.4 Equipement de suivi

Trois types de matériels sont utilisés pour suivre les niveaux des nappes :

- sonde automatique avec télétransmission (Fig.2a),
- sonde automatique à déchargement manuel (Fig.2b),
- sonde manuelle (Fig.2c).

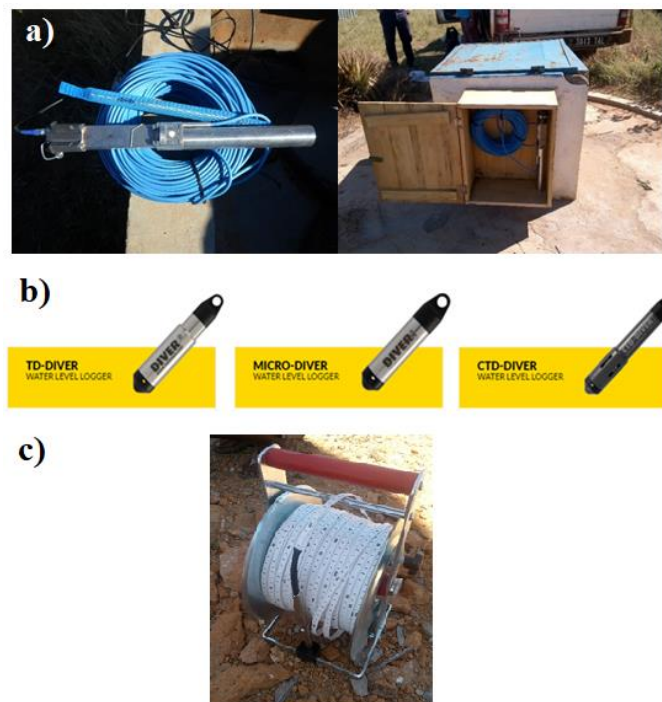


Figure 2 : Equipements de suivi

Les différentes sondes ont été choisies en fonction de la disponibilité de réseaux de connexion internet par sites.

II.5 Mise en œuvre et logistique

Pour les sites équipés des sondes automatiques à télétransmission (sites implantés par l'UNICEF), la collecte des données est journalière à l'aide d'un enregistreur à télétransmission automatique ou GPRS Datalogger Type 255-EB (Fig.2a). Les mesures sont programmées toutes les 4 heures, la transmission des données se fait à minuit vers le serveur FTP (<https://www.ht-analytics.de/login>). La sonde mesure en parallèle la hauteur d'eau, la température et la conductivité électrique.

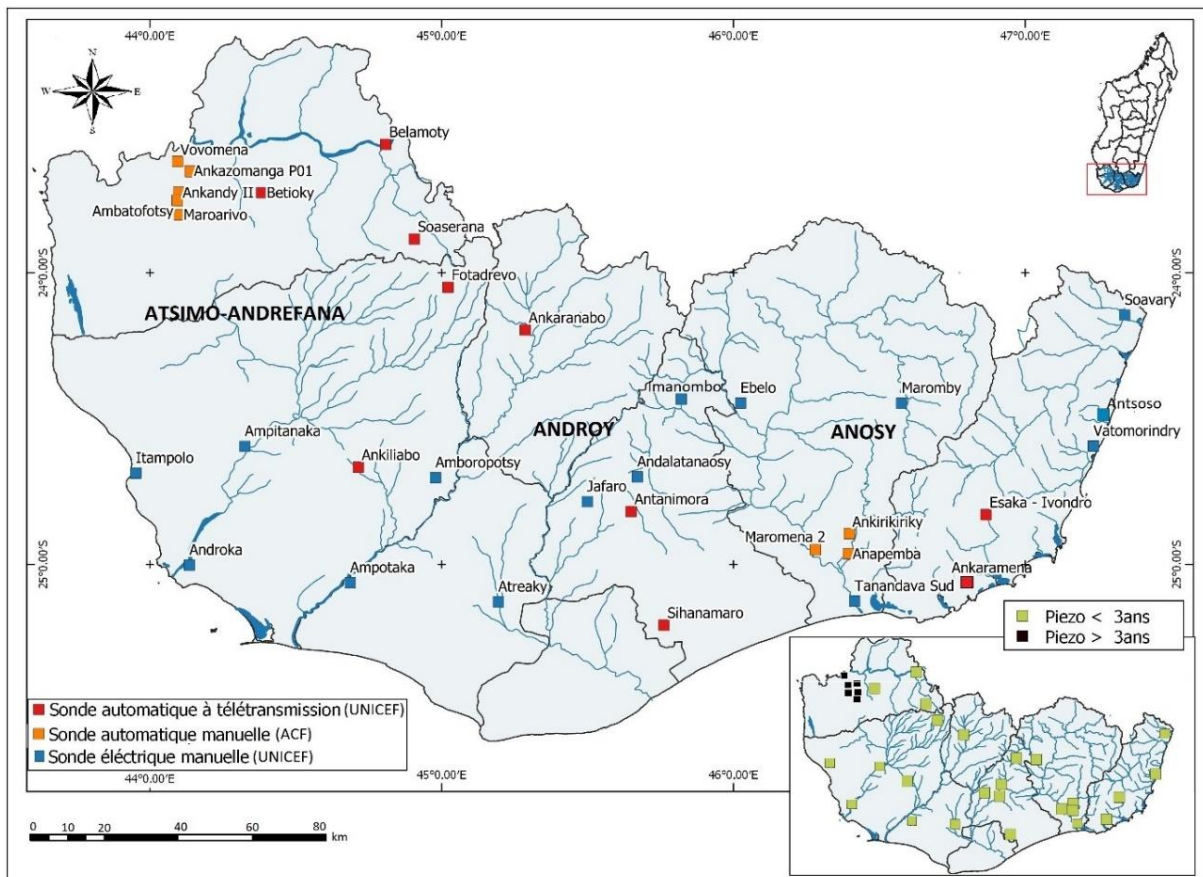


Figure 3: Localisation des sites

Pour les sondes automatiques implantées par ACF, ils sont de trois types : TD-Diver, MICRO-Diver, CTD-Diver (Fig.2b). Ces capteurs mesurent la hauteur d'eau et la température. On notera que le modèle CTD-Diver permet également de mesurer la conductivité électrique. Ces sondes sont implantées dans les puits et forages et sont programmées pour un pas de temps d'acquisition de 1 heure. Avec ce pas de temps d'acquisition, les sondes sont autonomes pour deux ans et stockent les données dans la mémoire interne. Tous les 3 à 4 mois, les données sont collectées par une équipe qui se déplace sur le terrain et assure la maintenance du matériel.

Pour les sites équipés des sondes piézométriques manuelles (Fig.2c), les prises de données sont hebdomadaires, très tôt le matin 5h – 6h ou en journée mais il est impératif d'éteindre le système d'alimentation de la pompe afin d'arrêter le pompage et attendre une heure au minimum avant le début des mesures des niveaux d'eaux. Cela permettra au niveau d'eau de

remonter et de se stabiliser ou en journée après avoir éteint la pompe. Un technicien de terrain est formé par site pour prendre les mesures par semaine.

Tableau 1: Liste et caractéristiques des sites de suivi

Région	District	Commune	Longitude (X)	Latitude (Y)	Types	Année de début du suivi	Formation géologique	
ANOSY	Toalagnaro	Vatomorindry	47.2336	-24.5943	Manuel	Janv. 19	Socle cristallin	
		Antsoso	47.2335	-24.5943	Manuel	Fev. 19	Socle cristallin	
		Esaka - Ivondro	46.8653	-24.8295	Automatique	Juin.2019	Socle cristallin	
	Amboasary	Ankaramena	46.7358	-25.0532	Automatique	Fev. 2019	Socle cristallin	
		Soavary	47.3403	-24.1448	Manuel	Nov.2019	Socle cristallin	
		Maromby	46.5761	24.4468	Manuel	Nov.2019	Socle cristallin	
		Ebelo	46.0240	-24.4468	Manuel	Avril.19	Volcanique	
		Ankirikiriky	46.3972	24.8942	Automatique	2019	Sédimentaire	
		Maromena 2	46.2806	-24.9497	Automatique	2019	Sédimentaire	
	ANDROY	Ambovombe	Anapemba	46.3944	-24.9633	Automatique	2019	Sédimentaire
			Tanandava Sud	46.4150	-25.1258	Manuel	Dec. 2020	Sédimentaire
			Jafaro	45.4983	-24.7847	Manuel	Fev.2019	Socle cristallin
Beloha		Andalatanosy	45.6703	-24.7002	Manuel	Fev.2019	Socle cristallin	
		Antanimora	45.6488	-24.8182	Automatique	Juin.2019	Socle cristallin	
		Sihanamaro	45.7615	-25.2081	Automatique	Fev.2019	Sédimentaire	
		Imanombo	45.8211	-24.4334	Manuel	Nov.2019	Socle cristallin	
Bekily		Atreaky	45.1941	-25.1283	Manuel	Avril.19	Sédimentaire	
		Ampotaka	44.6866	-25.0625	Manuel	Dec.2020	Sédimentaire	
		Ankaranabo	45.2867	-24.1961	Automatique	Fev.19	Socle cristallin	
ATSIMO - ANDREFANA	Ampanihy	Amboropotsy	44.9788	24.7025	Manuel	Juin.2019	Socle cristallin	
		Ankiliabo	44.7143	-24.6667	Automatique	Juin.2019	Socle cristallin	
		Itampolo	43.9516	-24.6868	Manuel	Dec.2019	Sédimentaire	
		Androka	44.3945	-24.0180	Manuel	Juil. 2020	Sédimentaire	
	Betioky	Ampitanaka	44.3254	-24.5952	Manuel	Dec.2019	Sédimentaire	
		Fotadrevo	45.0218	-24.0493	Automatique	Mars.19	Socle cristallin	
		Soaseranana	44.9062	-23.8841	Automatique	Mars.19	Socle cristallin	
		Betioky	44.3830	-23.7250	Automatique	Juin.2019	Sédimentaire	
		Belamoty	44.8080	-23.5595	Automatique	Juin.2019	Sédimentaire	
		Ankazomanga P01	44.1370	-23.6504	Automatique	2016	Sédimentaire	
		Ankazomanga P06	44.1401	-23.6532	Automatique	2016	Sédimentaire	
		Ankandy II	44.0984	-23.7245	Automatique	2014	Sédimentaire	
		Vovomena	44.0945	-23.6182	Automatique	2016	Sédimentaire	
		Ambatofotsy	44.0939	-23.7520	Automatique	2016	Sédimentaire	
Maroarivo	44.1008	-23.8008	Automatique	2016	Sédimentaire			

Les données sont archivées manuellement dans un bloc note qui est maintenue à jour après chaque campagne de mesures puis transmises au bureau régional pour transfert à l'équipe d'Antananarivo.

La carte présentée dans la Fig.3 montre la répartition géographique des sites et le Tab.1 récapitule le nombre d'ouvrages suivi et le contexte hydrogéologique.

II.6 Accessibilité des données et mutualisation des efforts

Plusieurs acteurs sont impliqués dans le suivi des ressources en eau souterraine, entre autres l'Etat représenté par le Ministère de l'Eau, Assainissement et Hygiène (MEAH) à travers les directions régionales et l'Autorité Nationale de l'Eau et de l'Assainissement (ANDEA), la Direction Générale de la Météorologie (DGM), les Universitaires (Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (IOGA), Université de Tuléar, Sorbonne Université), les Agences des Nations Unies représentées par l'UNICEF, les ONG internationales (ACF). Il y a également les structures locales comme les fermiers et les gestionnaires des points d'eau qui ont été formés pour collecter les données des sites équipés de sondes manuelles.

Les données sont disponibles au niveau de chaque agence (UNICEF et ACF). Les données gérées par ACF sont également disponibles sur leur site internet (ACF, 2022).

III. Traitement et analyse de données

Les ouvrages sont classés en fonction de l'année du début de suivi ainsi que les nombres de mesures effectuées. Deux classifications ont été retenues : les ouvrages de surveillance de moins de **3 ans** et les ouvrages de suivi de plus de **3 ans**.

- Pour l'ensemble des ouvrages (plus ou moins de 3 ans d'observation) un symbole est attribué et permet d'illustrer la dynamique par rapport au mois précédent (Fig. 4). L'attribution du symbole se fait en comparant le niveau statique mensuel moyen (NSm) du mois en cours par rapport au niveau statique du mois précédent. On attribue ensuite le symbole « hausse », « stable » ou « baisse ».

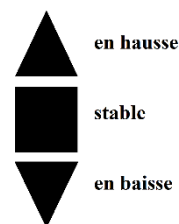


Figure 4 : Symbole représentant la tendance de l'évolution du niveau piézométrique






- Pour les ouvrages plus de 3 ans d'observation, deux actions sont entreprises, d'une part le symbole de la tendance de l'évolution par rapport au mois précédent (Fig. 4) et d'autre part le calcul de l'**Indice de Position (IP)** développé par le BRGM (Seguin, 2015). Il consiste à quantifier les écarts à la moyenne de façon homogène pour tous les piézomètres.

$$IP = \frac{NS_{moy} - NS_{min}}{NS_{max} - NS_{min}}$$

avec NS_{moy} : niveau moyen mensuel du mois en cours
 NS_{max} : niveau moyen maximal de la série
 NS_{min} : niveau moyen minimal de la série

Une proposition de classification de niveau des nappes est proposée ensuite en fonction de la valeur de l'IP. Le niveau est défini comme étant « très bas », « bas », « normal », « haut », « très haut » avec des couleurs indicatives (Tableau 2).

Tableau 2 : Proposition de classification suivant l'IP

	IP	Code couleur
Niveau d'eau très haut	> à 0.81	
Niveau d'eau haut	0.61 à 0.80	
Niveau d'eau normal	0.41 à 0.60	
Niveau d'eau bas	0.21 à 0.40	
Niveau d'eau très bas	< à 0.20	

IV. Résultats et interprétation

IV.1. Analyse des données temporelles

Comme mentionné dans la méthodologie, trois types de matériels sont utilisés (manuel, automatique, automatique à télétransmission). Ainsi, les données obtenues sont présentées sous trois formes :

- i) des données prises hebdomadairement ;
- ii) les données prises toutes les heures (Fig. 5) ;
- iii) des données prises toutes les 4 heures (Fig.6).

Dans cet article, nous présentons uniquement les résultats représentatifs de chaque formation hydrogéologique existant dans la zone d'étude. Les résultats obtenus sur le plateau Mahafaly sont représentés par les graphes de la Figure 5 et ceux de la Figure 6 pour les résultats obtenus dans les zones de socle cristallin.

La Figure 5 représente la dynamique piézométrique sur la période 2014-2022. On remarque sur l'ensemble des ouvrages, un phénomène de recharge et de décharge saisonnière des aquifères. On remarque que les niveaux piézométriques varient fortement au cours de la journée du fait de l'exploitation des ouvrages.

La nuit, les ouvrages retrouvent un niveau piézométrique proche du niveau naturel. Des différences notables sont visibles sur les patrons de recharge. On remarque que les ouvrages les moins profonds : Ankandy (5 m) ou Ankazomanga_P01 (6 m)) sont très réactifs à la pluie, tandis que les ouvrages les plus profonds : Ambatofotsy (14 m) et Vovomena (28 m)) ont des pics de recharge beaucoup plus lissés.

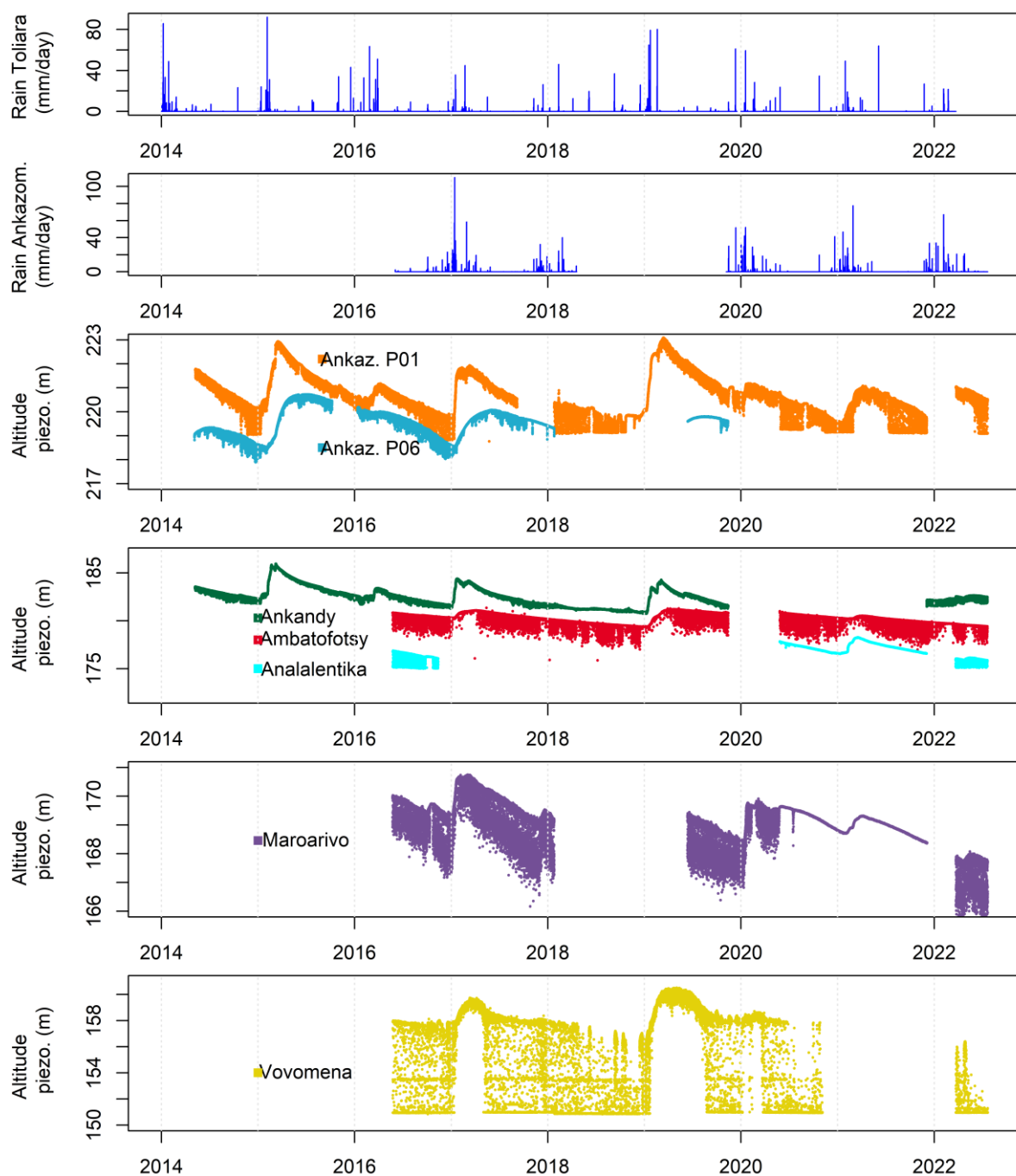


Figure 5 : Séquence des données de précipitations et des niveaux piézométriques prises toutes les heures

Pour les deux sites qui présentent les séquences de données piézométriques de 2019-2022 dans les sites sur le socle cristallin, on note les observations suivantes :

- pour Esaka – Ivondro, Région Anosy (Fig. 6A), on note une variabilité et légère baisse de niveau de nappe en 2021 pour lequel le niveau le plus bas a été enregistré vers sa fin. Mais, on remarque une recharge importante de la nappe cette année 2022. Notons que ce site n'est pas loin de la zone humide de Taolagnaro.
- pour le site à Ankiliabo dans la région Atsimo Andrefana (Fig.6B), bien que l'allure de la courbe soit stable pendant une certaine période de l'année, on note une baisse importante du

niveau de la nappe vers la fin de l'année 2021. Ceci a engendré une baisse du niveau de la recharge pour le début de l'année 2022 et c'est le niveau de recharge le plus bas noté pendant les 3 années d'observation.

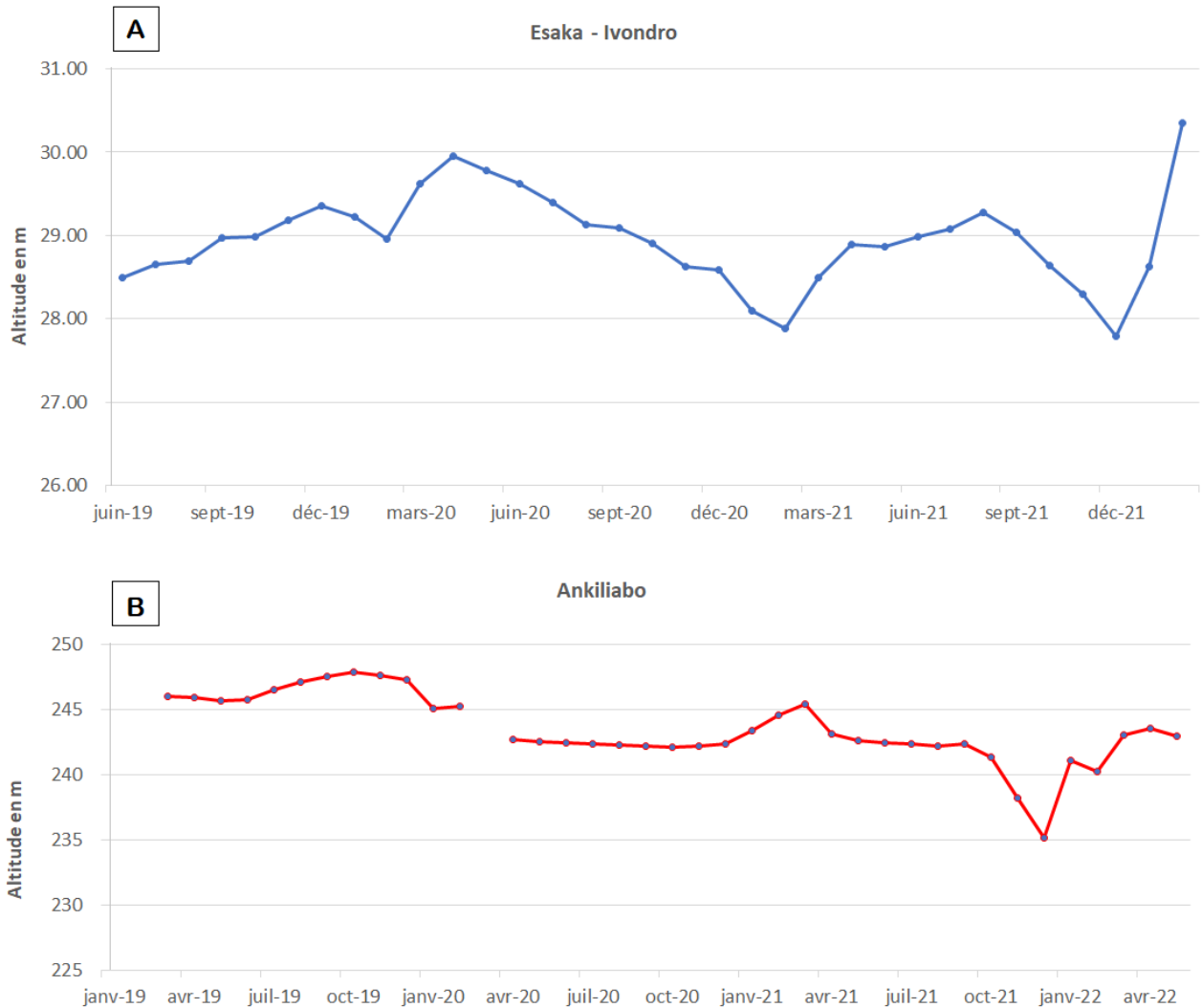


Figure 6 : Quelques séquences de données piézométriques 2019-2022 dans les sites sur le socle cristallin.

IV.2. Interprétation

A partir de ces données, on calcule le niveau piézométrique naturel moyen mensuel. Ces niveaux mensuels sont ensuite présentés sur une carte indiquant l'état des niveaux d'eau pour le mois en cours pour chaque point d'eau. Ces cartes sont interprétées et permettent d'établir un bulletin trimestriel de synthèse de la variation des niveaux d'eau des aquifères dans le Grand Sud de Madagascar. Tous les partenaires du secteur de l'eau sont associés : UNICEF, ACF, DGM, IOGA, Ministère de l'Eau, Université de Tuléar, Sorbonne Université.

La carte de la Figure 7 présente la synthèse de l'état des nappes d'eaux souterraines dans le Sud pour le mois de Juillet 2022 pour l'ensemble des ouvrages suivis. La tendance générale observée met en évidence une situation en baisse. En effet, la situation du Grand Sud est très alarmante, les niveaux des nappes continuent à se dégrader, tous les sites de suivi présentent des niveaux d'eau bas à très bas sauf pour quelques sites de bord de rivières.

Les sites situés dans les districts de Betioky, Ambovombe et Amboasary demeurent avec un niveau d'eau bas à très bas avec tendance à la baisse par rapport au mois précédent. En revanche, les sites sur la cote de Taolagnaro et Ampanihy présentent des niveaux d'eau « normaux à niveau d'eau haut » mais, aussi, avec tendance à la baisse. Pour les sites suivis moins de trois ans (noir), les tendances sont à la baisse ou stables par rapport au mois précédent.

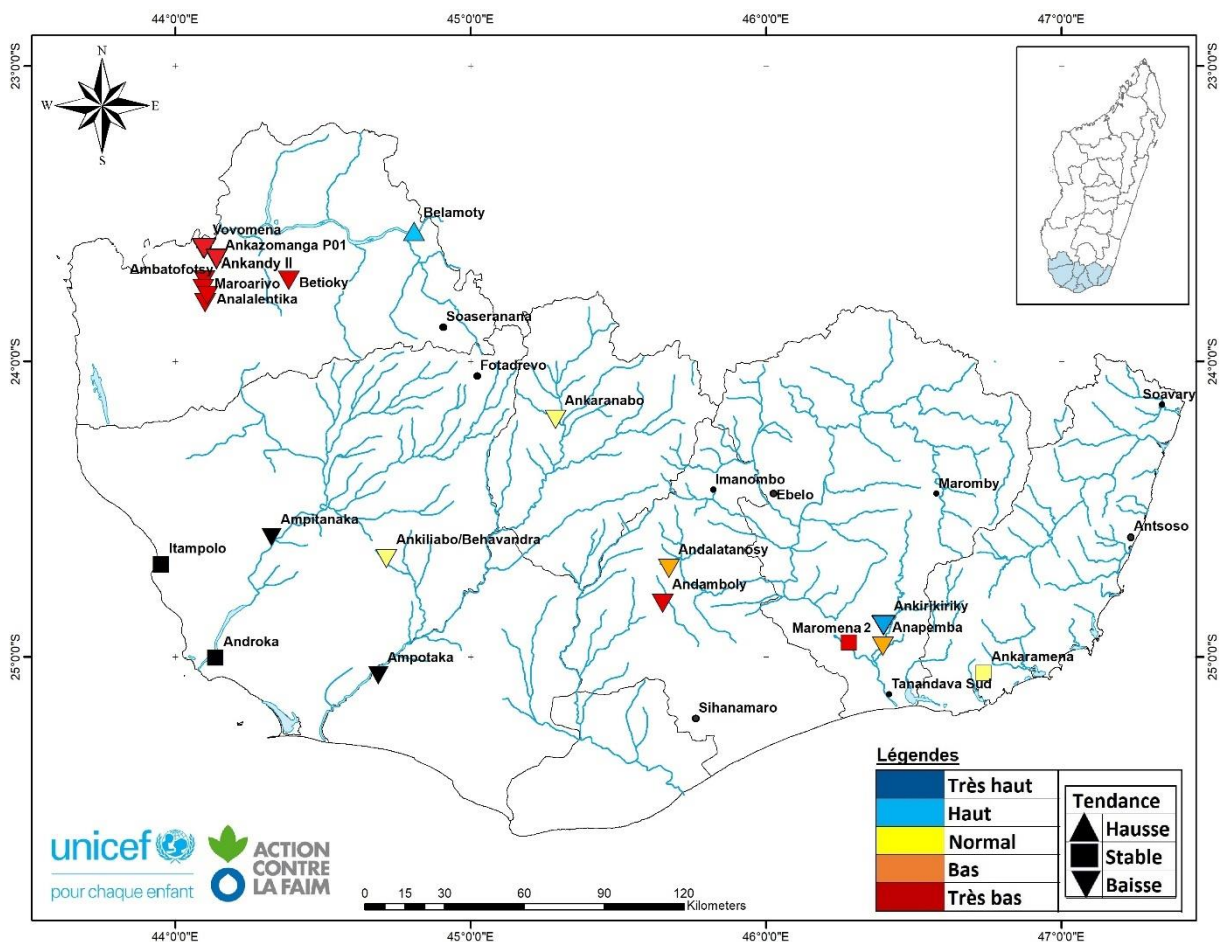


Figure 7 : Situation des nappes au mois de juillet 2022

V. Discussion et Conclusion

Depuis 2014, des sites d'observation des niveaux d'eaux dans les forages du Grand Sud de Madagascar ont été mis en place par ACF puis par UNICEF depuis 2019. Les efforts ont été combinés afin d'apporter plus de données et des résultats plus pertinents pour pallier les problèmes liés à la sécheresse chronique dans cette zone semi-aride de Madagascar.

Le suivi des niveaux de nappes présente deux principaux intérêts : i) pour améliorer le SAP et minimiser les dégâts socio-économiques causés par la sécheresse. ii) pour étudier l'effet du changement climatique global sur les ressources en eaux souterraines du Grand Sud. Actuellement, les suivis sont sous la tutelle de l'ACF et de l'UNICEF assistés par des organismes gouvernementaux et des universités de Madagascar. Cependant, à plus long terme, l'ensemble des parties prenantes affiche un souhait fort de laisser la main aux institutions et universités malgaches.

Durant les trois dernières années (2019-2021), sur les sites de huit années d'observation, nous avons observé une faible recharge due aux faibles précipitations. De ce fait, des mesures d'accompagnement ont été recommandées pour les zones où les niveaux d'eau sont très critiques entre autres :

- gestion de pompes d'eau (niveau très bas),
- favoriser ou développer des solutions de rétention et de stockage d'eau souterraine tel que le Réservoir d'Eau Enterré Plein de Sable (REEPS),
- transport d'eau par camion dans les zones critiques (communauté, centres de santé)
- mise en place de forages d'urgence.

Les résultats et les données obtenus jusqu'à aujourd'hui ont permis de suivre et de qualifier le niveau de sécheresse. Néanmoins, ils ne permettent pas encore de juger si les sécheresses des dernières années sont imputables aux changements climatiques. Un suivi à plus long terme, plus de 10 ans, est encore nécessaire pour nourrir des réflexions scientifiques qui permettront de modéliser et d'améliorer la gestion des eaux souterraines dans le Sud de Madagascar.

Références bibliographiques

Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K. M., Schneider, A., Hartmann, J., et Lehner, B. (2019). Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. *Nature Climate Change*, 9(2), 137-141.

Dai A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3 (1) : 52-58

Garo, J.S. (2012). Approche multidisciplinaire de l'étude hydrogéologique du bassin d'Ambovombe Androy dans l'Extrême Sud de Madagascar. Thèse de Doctorat Université d'Antananarivo, 210p.

Guyot, L. (2002). Reconnaissance hydrogéologique pour l'alimentation en eau d'une plaine littorale en milieu semi-aride : Sud-Ouest de Madagascar (Doctoral dissertation, Luc Guyot).

Kolusu, S. R., Shamsudduha, M., Todd, M. C., Taylor, R. G., Seddon, D., Kashaigili, J. J., ... et MacLeod, D. A. (2019). The El Niño event of 2015-2016: climate anomalies and their impact on groundwater resources in East and Southern Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1751-1762.

Lachassagne, P., Wyns, R., et Dewandel, B. (2011). The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23(3), 145-161.

- Rabemanana, V. (2002). Origine et Caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de la région de l'Androy (Sud de Madagascar). Thèse de doctorat, Université de Paris 6, 204p.
- Rakoto, H.A. (2003). Caractérisation par géophysique, hydrogéologie classique et hydrochimie des aquifères en zone semi-aride : exemple du bassin sédimentaire de Beloha. Extrême Sud de Madagascar. Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, 146p.
- Seguin, J.J. (2015). Proposition d'un indicateur piézométrique standardisé pour le Bulletin de Situation Hydrologique « nappes ». Rap. final. BRGM/RP-64147-FR.89p., 39 ill., 6 tabl., 4ann.
- Serele, Charles., Perez-Hoyos., Kayitakire Francois. 2019. Mapping of groundwater potential zones in the drought-prone areas of south Madagascar using geospatial techniques, *Geoscience Frontiers*, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.11.012>
- Tadross, M., Randriamarolaza, L., Rabefitia, Z., et Zheng, K. Y. (2008). Climate change in Madagascar ; recent past and future. *Washington, DC : World Bank*, 18.
- Taylor, R.G., Todd, M.C., Kongola, L., Maurice, L., Nahozya, E., Sanga, H. et MacDonald A.M. (2012). Evidence of the dependence of groundwater resources on extreme rainfall in East Africa. *Nature Climate Change* 3 (4) : 374
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., LeBlanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R., Yechieli, Y., Gurdak, J., Allen, D., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P., Holman, I., et Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature climate change*, 3(4), 322-329.
- Taylor, R. G., Favreau, G., Scanlon, B. R., et Villholth, K. G. (2019). Topical Collection: Determining groundwater sustainability from long-term piezometry in Sub-Saharan Africa. *Hydrogeology Journal*, 27(2), 443-446.

Sites web

1. <https://news.un.org/fr/story/2021/01/1086412>
2. <https://www.actioncontrelafaim.org/en/groundwater-resource-observatory-for-the-southwestern-madagascar/>
3. <https://www.unicef.org/madagascar/rapports/synth%C3%A8se-trimestrielle-de-la-variation-des-nappes-phr%C3%A9atiques-dans-le-grand-sud-de-0>
4. <https://www.unicef.org/madagascar/rapports/bulletin-dalerte-s%C3%A9cheresse-du-grand-sud-de-madagascar-2022>