

Éléments de construction et de mise en service de réseaux d'eau potable de la région Sud-Ouest de Madagascar



Kiosque à eau, Ambahikily, Région Atsimo Andrefana, Madagascar

Rapport préparé par Sara Jib (ENGEES) revu par Amandine Gilbert et Jean-Pierre Mahé, Octobre 2018

Projet financé par le Syndicat des Eaux d'Ile de France et l'Agence de l'Eau Seine Normandie



1 Présentation générale

Le présent document a été rédigé dans le cadre d'un stage de fin d'études de Sara JIB, élève ingénieure à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. Il a pour but de décrire et faire une analyse critique de l'ensemble des opérations techniques réalisées dans le cadre des projets d'eau potable dans la région Atsimo Andrefana (Région Sud-Ouest de Madagascar).

Depuis 2014, Experts-Solidaire vient en appui à la Direction Régionale de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène d'Atsimo Andrefana (DREAH AA), basée à Tuléar et a participé à la réalisation ou la réhabilitation de plusieurs projets d'alimentation en eau potable (AEP) ainsi qu'à l'amélioration de leur gestion et leur suivi.

Experts-Solidaire est une association fondée en 2011, sur le constat que l'expertise est insuffisamment partagée dans le monde. Elle compte actuellement plus de 70 experts dans le domaine de l'eau et de l'assainissement, de l'électrification, de l'urbanisme et de l'agroalimentaire qui mettent leur expertise au profit des projets dans les pays en voie de développement.

La région Atsimo Andrefana est située dans le Sud-Ouest de Madagascar et se caractérise par une situation critique de l'approvisionnement en eau potable. Actuellement, la région a bénéficié d'un grand nombre de projets d'AEP dans le cadre des partenariats avec quelques organisations (Experts Solitaires, UNICEF, CRS, WWF, etc).

En vue d'une prise de recul par rapport à ce qui y a été déjà fait, Experts-Solidaire, avec le support du SEDIF (l'un des principaux bailleurs de fonds dans la région Atsimo Andrefana), a décidé de réaliser une capitalisation technique des projets réalisés et en cours de réalisation dans la région. Elle doit permettre de détecter les points forts et les points faibles des expériences vécues et de tirer des enseignements pour les projets à venir.

Ce rapport se présente sous forme d'un guide construit sur le mode d'une présentation de la théorie et de cas pratiques dans les villages où ont été réalisés des réseaux d'eau potable dans la région Atsimo Andrefana.

Les cas de figure présentés dans ce document concernent en particulier les projets ayant été suivis, en totalité ou en partie, par Experts-Solidaire. Les communes faisant l'objet des projets présentés sont : Ambahikily, Ambohimahavelona, Saint Augustin, Ankililoaka et Tanandava (en cours de réalisation). Elles sont réparties sur la région et comptent un nombre d'habitants variant de 5 500 à 16 000 habitants.

2 Table des matières

1	Présentation générale.....	2
3	Glossaire de termes et abréviations.....	6
4	Localisation des communes de l'étude	7
5	Processus de mise en place des réseaux d'eau potable	8
5.1	Identification.....	9
5.2	Planification.....	9
5.2.1	Avant Projet Sommaire, proposer les options d'intervention	10
5.2.2	Demande aux bailleurs de fonds.....	11
5.3	Concertation et conventions.....	12
5.4	Conception.....	12
5.4.1	APD, Avant Projet Détaillé.....	12
5.5	Construction.....	13
5.5.1	Appels d'offres	13
5.5.2	Négociation	16
5.5.3	Contractualisation	16
5.5.4	Dossier d'exécution.....	17
5.5.5	Déroulement des travaux	17
5.5.6	Suivi et contrôle des travaux	17
5.5.7	Réception provisoire et définitive	18
6	Calculs de dimensionnement.....	19
6.1	Calcul des besoins journaliers d'eau potable	19
6.1.1	Nombre d'habitants.....	19
6.1.2	Estimation de la consommation journalière par habitant.....	20
6.2	Calcul du volume à servir (VS).....	22
6.3	Calcul du volume à pomper (VP)	22
7	Composantes techniques	23
7.1	Captage	23
7.1.1	Choix du type de captage.....	23
7.1.2	Etude géophysique	30
7.1.3	Conception et équipement d'un forage.....	33

7.1.4	Matériaux utilisés pour équipement de forage.....	37
7.1.5	Périmètres de protection	38
7.1.6	Réalisation d'un forage	39
7.1.6.4	<i>Essais de pompage</i>	46
7.1.6.4.1	Echantillonnage et analyse de l'eau après réalisation du forage.....	50
7.1.7	Forages spéciaux.....	51
8	Systèmes de traitement	54
8.1	Descriptif des étapes de traitement.....	55
8.1.1	Prétraitement.....	55
8.1.2	Stockage- Décantation.....	55
8.1.3	Clarification	56
9	Système d'exhaure	61
9.1	Choix de la pompe	61
9.1.1	Type de pompe	61
9.1.2	Dimensionnement	62
9.2	Position d'une pompe immergée.....	64
9.3	Equipement de pompage	64
10	Système d'énergie du système d'exhaure	66
10.1	Différents types de système d'énergie	66
10.2	Dimensionnement des deux options	67
10.2.1	Groupe électrogène	67
10.2.2	Energie solaire	68
10.3	Protections	72
10.3.1	Installation « pompe standard + panneaux solaires » à Ambahikily	73
10.3.2	Installation « pompe solaire + panneaux solaires » à St Augustin.....	75
11	Système de stockage.....	77
11.1	Types de réservoir d'eau potable	77
11.1.1	En terme de hauteur	77
11.1.2	En terme de matériau de construction	78
11.2	Dimensionnement	80
11.2.1	Aspect hydraulique.....	80
11.2.2	Génie civil.....	81

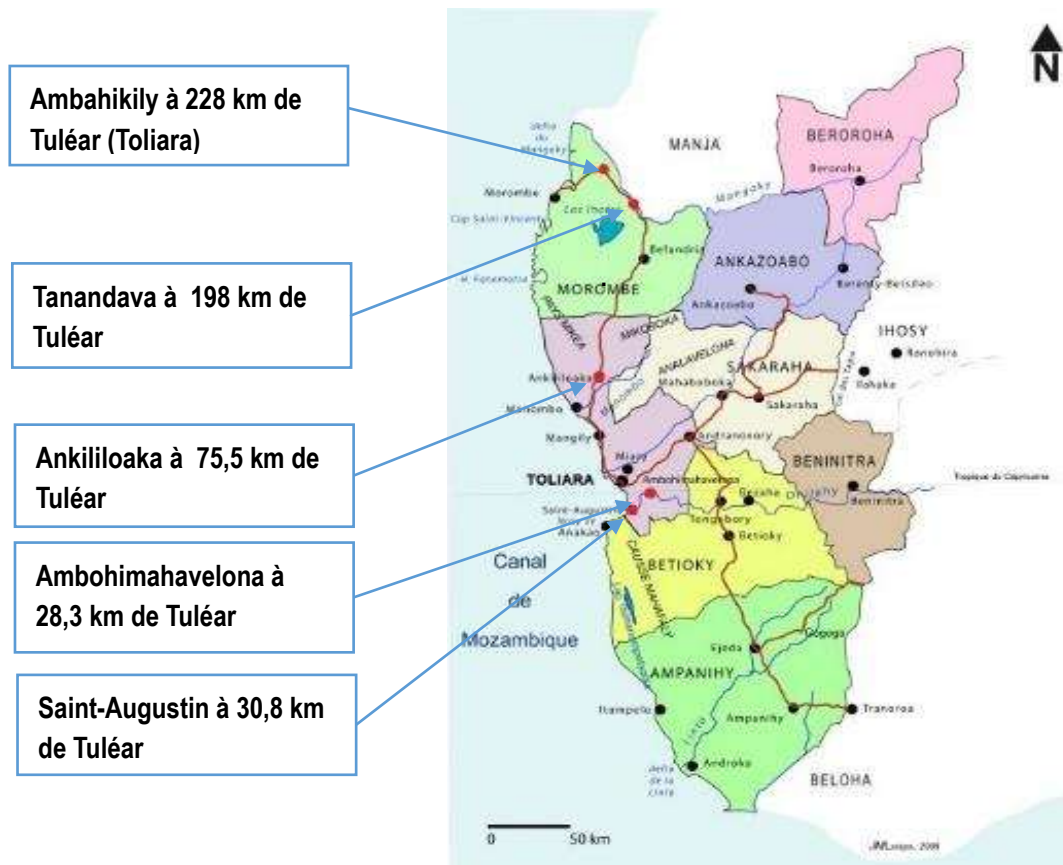
11.3	Emplacement du réservoir	82
11.4	Composantes d'un réservoir	82
11.4.1	Equipements hydrauliques	83
11.4.2	Etanchéité	85
11.4.3	Aération et éclairage	86
11.4.4	Temps de séjour	86
11.4.5	Suivi et entretien	86
12	Réseau de distribution	87
12.1	Tracé du réseau	87
12.2	Dimensionnement et modélisation	88
12.3	Matériaux	90
12.4	Accessoires.....	92
12.5	La pose des conduites	92
12.6	Nettoyage du réseau de distribution.....	93
12.7	Mise en service du réseau de distribution	94
12.7.1	Points d'attention.....	94
13	Points de distribution d'eau	97
13.1	Types de points d'eau	97
13.1.1	Borne Fontaine (BF) / Kiosque à Eau (KE)	97
13.1.2	Branchement Privé (BP) et Branchement Social (BS).....	98
14	Mise en gestion par délégation	100
14.1	Différents types de délégation.....	100
14.2	Contrat de délégation.....	101
14.2.1	Rôle du délégataire et de son personnel.....	101
14.2.2	Entretien et maintenance	102
14.2.3	Politique de sensibilisation et d'information.....	103
14.2.4	Egalité et transparence	103
14.2.5	Economie du délégataire.....	103
14.2.6	Rôle du délégant (commune)	103
15	Conclusion	104

3 Glossaire de termes et abréviations

- AEP : Adduction en eau potable
- AO : Appel d'offres
- AMO : Assistance à Maitrise d'Ouvrage
- APD : Avant-Projet Détaillé
- APS : Avant-Projet Sommaire
- BF : Borne fontaine
- BP : Branchement privé
- BPOR : Budget Programme d'Objectifs par Région
- CA : chiffre d'affaires
- CRD : Classic Real Drilling
- CRS : Catholic Relief Service
- DAO : Dossier d'appel d'offres
- DREAH AA : Direction Régionale de l'Eau, de l'Energie et des Hydrocarbures Atsimo Andrefana
- ETP : Evapotranspiration potentielle
- ETR : Evapotranspiration réelle
- MO : Maitre d'Ouvrage
- MOD : Maitre d'Ouvrage Délégué
- STEFI : Suivi Technique et Financier
- UNICEF United Nations International Children Fund
- V : Volts
- W : Watt

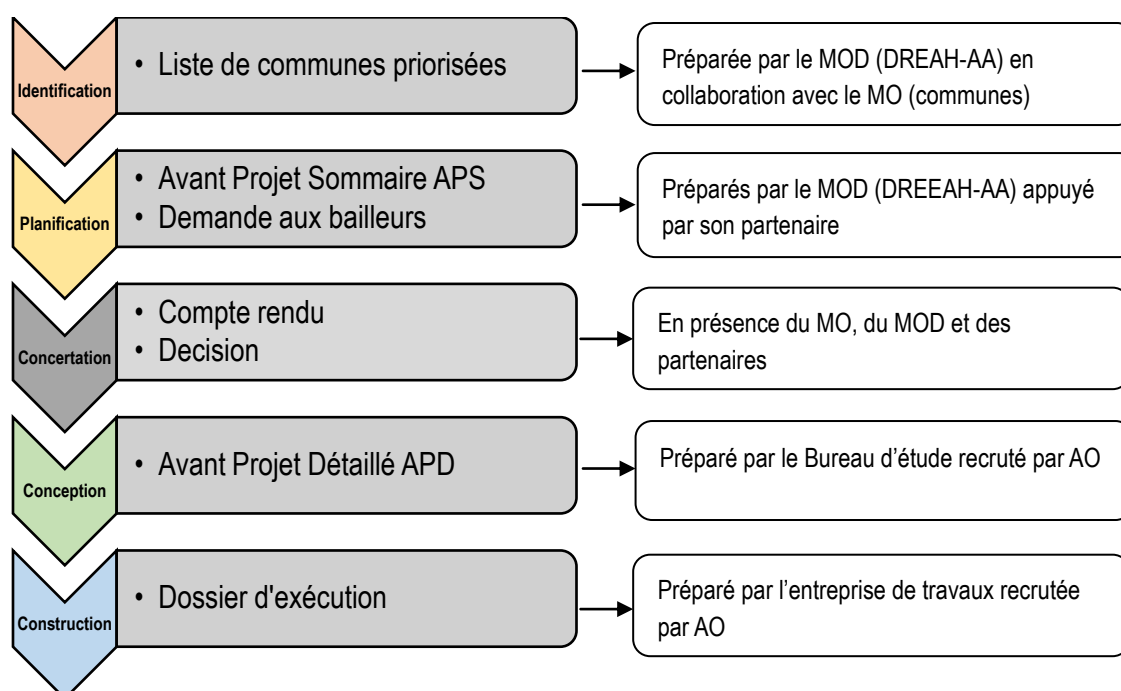
4 Localisation des communes de l'étude

Les communes faisant objet du présent rapport sont réparties dans la région Atsimo Andrefana comme suit :



5 Processus de mise en place des réseaux d'eau potable

Comme tout autre projet, la réalisation d'un réseau AEP nécessite une organisation au préalable de plusieurs phases. Ceci permet aux différents acteurs travaillant sur le projet d'assurer une bonne conception et un bon suivi du projet, d'optimiser le temps, de bien gérer la mobilisation du personnel, de structurer et normaliser les démarches à suivre pour la réalisation du projet. Le processus se résume en cinq majeures phases, comme indiqué ci-dessous :



Dans le code de l'eau Malgache, la commune est considérée le Maître d'Ouvrage (MO) des réseaux d'AEP, mais en raison de l'absence de moyens techniques et financiers suffisants pour leur réalisation et leur gestion, le Ministère de l'Eau et ses antennes régionales agissent en qualité de maître d'ouvrage délégué (MOD) pour l'appuyer.

Les réseaux d'AEP de la région Atsimo Andrefana n'échappent pas à cette règle et la DREAH en qualité de MOD, veille, à travers son appui aux communes, au respect de ces étapes.

Toutefois, l'état malgache adopte une stratégie progressive de décentralisation des décisions qui vise à terme à impliquer les communes dans le service de l'eau et à les responsabiliser chacun leurs domaines d'interventions.

5.1 Identification

Cette phase consiste à localiser les communes ayant un réel besoin de la réalisation ou la réhabilitation d'un réseau d'eau potable.

En raison d'absence d'un budget pouvant couvrir tous les projets d'AEP de l'ensemble des communes de la région, il est nécessaire d'appliquer une approche de priorisation des besoins qui prend en compte des critères d'accès, de population, d'urgence des besoins, etc. pour privilégier les communes les plus en difficulté en matière d'approvisionnement en eau potable.

Dans le cadre du BPOR (Budget Programme par Objectif Régional), le ministère de l'eau malgache établit des enquêtes régionales pour collecter des données renseignant sur les caractéristiques de chaque région dans le domaine de l'eau incluant les différents points d'eau qui y sont présents.

Une plateforme a été créée pour le mettre à disposition du grand public : La BDEA (Base de données sur l'eau, l'hygiène et l'assainissement à Madagascar), est un outil informatique mis par le MEAH¹ pour stocker et partager, avec tous les acteurs du secteur de l'eau et de l'assainissement, toutes les données essentielles pour les études et travaux de recherche et d'évaluation, des ressources en eaux souterraines et en eaux de surface, des points d'eau et des latrines.

Dans la région Atsimo Andrefana, plusieurs communes ont urgemment besoin de bénéficier d'un projet d'AEP en raison des difficultés rencontrées par la population pour l'approvisionnement en eau potable. Dans ces communes, l'eau est en qualité ou en quantité insuffisante pour la population.

La DREAH AA recueille des informations sur l'ensemble de la région (liste des points d'eau présents dans chaque commune, mode d'approvisionnement en eau potable, etc.). Pour compléter son enquête d'identification des besoins et d'étude de faisabilité, la DREAH mobilise son personnel pour la récupération des données nécessaires auprès des communes pour la vérification des critères de priorisation dont les principaux sont : Nombre d'habitants, situation actuelle d'approvisionnement en eau potable, infrastructures d'AEP existantes, engagement de la commune, accessibilité à la commune, etc.

Pour leur part, les communes, représentées par leurs maires, en qualité de MO, sont chargées d'informer la DREAH de leur souhait d'améliorer les conditions d'approvisionnement en eau potable, sous la forme d'une demande établie par la commune, signée par le maire et envoyée à la DREAH.

A l'issue de cette phase d'identification, une liste de communes est préparée par la DREAH AA et est mise à jour au fur et à mesure des investigations de ses agents sur le terrain et des demandes reçues des communes.

5.2 Planification

La phase de planification permet de tracer une stratégie à suivre pour le lancement des procédures d'avant-projet sommaire. Un planning prévisionnel est notamment établi en vue d'une projection dans le temps et d'une planification des projets à venir.

¹ MEAH : Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène

Après l'établissement de la liste des communes prioritaires, la DREAH AA la met à disposition de ses partenaires (Experts Solidaires, UNICEF, CRD, CRS, WWF, etc.) pour propositions de financement aux bailleurs de fonds. Ainsi les projets d'AEP appuyés par Experts-Solidaires concernent plutôt les gros bourgs et les petites villes rurales.

Participation des communes

Dans le cadre des projets réalisés au niveau de la région Atsimo Andrefana, la DREAH AA informe les communes souhaitant bénéficier d'un projet d'AEP, de la nécessité de participer soit en nature ou en numéraire à sa réalisation, afin de valider son intérêt et son engagement. Cette participation se fait sous la forme de mise à disposition des terrains nécessaires pour le projet, des la main d'oeuvre et de matériaux. La part minimale de participation de la commune dans un projet est estimée à 5% du coût des travaux et conception. Ainsi, Ankililoaka s'est engagée à fournir le terrain, le sable et à réaliser les fouilles. Le coût de ces opérations est estimé à 3000 euros.

5.2.1 Avant Projet Sommaire, proposer les options d'intervention

L'Avant-Projet Sommaire est un document rédigé par le maître d'ouvrage ou on confié à un consultant. L'APS apporte les informations générales sur le projet, susceptibles d'aider à comprendre et analyser le contexte du projet.

En effet, à partir des données disponibles et des enquêtes effectuées, l'APS inclut les caractéristiques de la commune et de sa population ; les activités socio-économiques de la commune, sa démographie, ses conditions climatiques ; le fonctionnement administratif et institutionnel lié au futur projet.

Un inventaire des infrastructures et équipements présents est répertorié dans l'APS pour pouvoir étudier leur utilisation. La confrontation des données rassemblées, des enquêtes effectuées sur site et de l'expérience dans la région, permet de présenter une première estimation des besoins de la commune et les options possibles à adopter pour la réalisation du réseau d'AEP.

Pour mieux comprendre le comportement et les souhaits de la population vis-à-vis du futur projet d'AEP à réaliser, l'APS se base sur des enquêtes auprès d'un échantillon représentatif de la population (généralement représentant 20% des habitants), permettant aussi d'estimer notamment le pouvoir d'achat, la capacité et la volonté de payer pour un nouveau service d'eau.

Les options possibles pour un futur projet sont étudiées et présentées avec une approche sommaire, des coûts d'investissement prévisionnels, le tarif et le dispositif de gestion à envisager, les avantages et inconvénients des solutions proposées, les modalités de mise en œuvre (planning notamment)

Cet APS est soumis aux parties prenantes et décisionnelles, discuté et débattu avec la population, et donne lieu une décision du Maître d'Ouvrage permettant d'ouvrir la voie aux prochaines étapes.

Un exemple de plan de l'APS d'Ankililoaka, réalisé par la DREAH AA appuyée par Experts-Solidaires, est présenté ci-dessous :

- *Présentation de la commune (Identification et localisation, informations administratives, autorités locales, description de la population, caractéristiques socio-économiques des ménages, activités économiques, service et infrastructure sociale, priorités de la population)*
- *Milieu physique, conditions climatiques et ressources en eau*
- *Analyse des besoins en eau : (Description de l'actuel approvisionnement en eau, métiers de l'eau, problèmes de l'accès à l'eau potable, estimation de la demande future en eau potable, contraintes administratives)*
- *Options techniques du réseau : (Description de l'ancien réseau, base du dimensionnement du nouveau réseau proposé, description générale des options possibles, estimation des coûts du réseau par option, etc.)*
- *Modalités de gestion des futurs réseaux (Principes du cadre légal et réglementaire, modèle de gestion, la question tarifaire, aspects sociaux, etc.)*
- *Organisation des tâches : (Budget global, calendrier d'exécution)*

L'étude d'APS est avant tout un travail de terrain, elle doit en particulier insister sur l'aspect démographique qui constitue la composante principale qui définit la taille d'un projet et par conséquent l'estimation de son budget global. Cet aspect peut fausser les données sur lesquelles est basé le projet, il est donc important d'y attacher une grande importance, et si nécessaire de faire un compage de la population.

Dans la région Atsimo Andrefana, le nombre exact d'habitants présents dans les communes est dans la majorité des cas inconnu ou inexact parce que les communes ne possèdent pas de registre répertoriant les nouveaux nés et les décédés de la commune.

Face au problème d'incertitude des données démographiques recueillies auprès des communes, la DREAH AA procède à une vérification en effectuant des enquêtes et un comptage des maisons. Ces enquêtes prennent en général quelques jours et dépendent des circonstances vécues dans la commune (jours du marché, d'enterrement, de fête, etc).

S'il s'avère que les résultats divergent ou qu'il est difficile de faire le comptage des maisons, la DREAH AA se réfère à Google Earth pour calculer le nombre total des toits présents dans le lieu de projet en multipliant par le nombre estimé de personne par maison.

5.2.2 Demande aux bailleurs de fonds

La demande de financement aux bailleurs de fonds peut concerner aussi bien la réalisation d'un nouveau réseau qu'une réhabilitation d'un réseau déjà existant. Elle est accompagnée du document d'APS et un planning prévisionnel du déroulement du projet,

Afin d'accorder leur financement des projets à réaliser dans la région Atsimo Andrefana, les bailleurs de fonds exigent la rédaction d'une demande par le MO. Cette demande doit faire apparaître tous les motifs justifiant la faisabilité du projet à financer en fournissant des estimations des objectifs à atteindre et du budget global.

5.3 Concertation et conventions

Une fois que la base de financement a été identifiée, cette étape a pour but de rassembler les acteurs institutionnels, financiers, techniques, sociaux qui seront impliqués dans le futur projet et de définir les rôles de chacun, de déterminer les étapes à suivre, de définir les conditions de financement des prestataires. C'est le moment des conventions que signent les acteurs pour s'engager avant le lancement de la conception du projet.

5.4 Conception

La conception d'un système d'AEP est la phase qui, à la base d'une étude profonde du contexte du projet, permet de dimensionner tout le réseau. Pour ce faire, le MO fait en général appel à un bureau d'étude.

Le dimensionnement d'un réseau d'AEP requiert l'acquisition de connaissances des domaines de l'hydraulique et du génie civil. Le bureau d'étude en charge de la conception doit alors faire preuve de maîtrise totale de ces deux secteurs d'activités. Dans le cas contraire, il peut y avoir une coordination entre deux bureaux d'étude excellant chacun dans un domaine.

Le bureau d'étude mobilise ses agents pour effectuer des enquêtes au sein de la commune en question pour pouvoir tirer des conclusions sur les aspects : économique, social, ainsi les exigences hydrauliques du terrain qui sont fonction de la topographie, l'emprise foncière, etc. Il est également amené à exploiter tous les moyens techniques (logiciels, formules empiriques, etc) pour optimiser la conception du réseau.

Les enquêtes réalisées doivent impliquer au maximum les représentants officiels locaux pour qu'ils soient au courant des informations transmises au ou par le bureau d'étude et qu'ils prennent les mesures nécessaires pour faciliter sa tâche.

5.4.1 APD, Avant Projet Détaillé

L'APD fait apparaître toutes les données nécessaires qui justifient les décisions prises pour le dimensionnement du réseau et le choix des options à adopter.

Un APD doit faire figurer les points suivants :

- Analyse des caractéristiques géographiques et hydrogéologiques,
- Analyse des caractéristiques démographiques socio-économiques,
- Analyse géophysique si besoin
- Etudes topographiques
- Description de la méthodologie et du déroulement de l'étude,
- Analyse des ressources en eau,
- Analyse des besoins en eau,
- Justification du dimensionnement de tout le réseau (aspects hydraulique et génie civil),
- Inventaire des matériaux à utiliser,
- Plans explicatifs nécessaires pour les travaux
- Devis estimatif,

- Planning prévisionnel du déroulement des travaux,
- Etc,

Un APD se base sur l'énoncé de l'APS mais il ne doit pas se contenter de reprendre ses données sans le moindre détail, au contraire il doit approfondir et justifier ses données en réalisant des enquêtes et des études sur le terrain et en utilisant des logiciels si possible pour approuver les résultats requis. Outre, il peut apporter des modifications ou proposer d'autres options susceptibles de développer le projet.

La validation de l'Avant Projet Détaillé se fait en concertation entre le Maitre d'Ouvrage, la maitre d'Ouvrage Délégué, et l'Assistant à Maitre d'Ouvrage, qui est chargé de les appuyer. Une fois validée l'APD s'ouvre la période d'appel d'offres pour la construction.

5.5 Construction

La construction vient après la phase de la conception pour concrétiser/matérialiser ses résultats. Elle concerne l'ensemble du réseau.

Pour le captage, il est souvent souhaitable de faire appel à une entreprise de forage, tandis que pour le reste des travaux, ils peuvent être assurés par une seule entreprise de travaux.

Lors de la réception des offres des soumissionnaires pour la prestation de travaux, le MOD vérifie la cohérence entre le planning d'approvisionnement en matériaux et de mobilisation du personnel avec le planning d'exécution des travaux ainsi la pertinence de sa méthodologie d'exécution.

5.5.1 Appels d'offres

Les AO concernent les entreprises de travaux (entreprise de forage et entreprise de construction), les prestations intellectuelles (bureau d'étude, consultants, délégataire, etc) et les entreprises de fournitures (matériaux et matériels de construction, pompes, panneaux solaires, etc.).

Les principaux points à suivre lors d'un AO sont résumés comme suit :

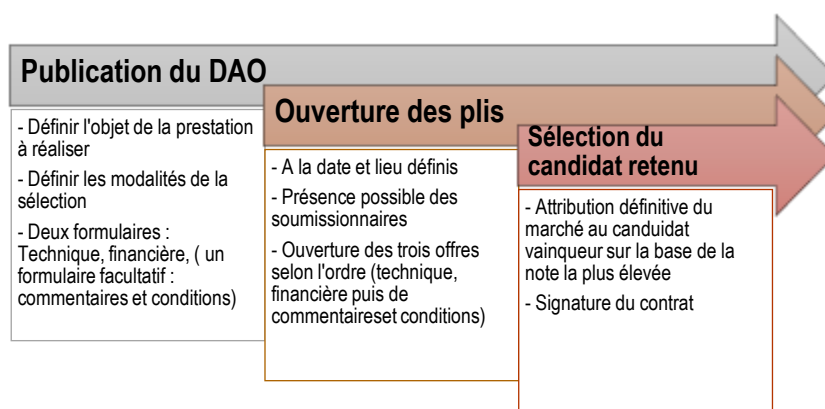


Figure 1 : Principales étapes d'un Appel d'Offres



Figure 2 : Ouverture de plis des offres d'affermage d'Ankililoaka- Directeur de la DREAH AA, chef du service administratif, chef du service technique et Maire d'Ankililoaka

Pour une grande majorité des soumissionnaires de la région Atsimo Andrefana, répondre à un AO n'est pas la démarche qu'ils suivent habituellement pour assurer leurs prestations. Ils n'ont pas l'habitude de préparer un dossier complet avec des offres administrative, technique et financière. Par conséquent, parfois, ils fournissent des dossiers avec des documents manquants ou non actualisés, et parfois les dossiers arrivent en retard par rapport au dernier délai de dépôt des offres. Néanmoins il a été constaté un intérêt remarquable de la part des prestataires régionaux, mesuré par leurs réponses et leur participation aux ouvertures des plis.

Par ailleurs, il a été constaté que certaines entreprises préfèrent participer en tant qu'entreprises de travaux plutôt que bureaux d'étude. Conséquemment, la DREAH AA reçoit plus de candidature pour les prestations de construction que pour la maîtrise d'œuvre et se trouve parfois dans l'obligation de relancer un autre AO pour inciter les bureaux d'études à y participer.

Préparation du Document d'Appel d'Offres : DAO

La réalisation d'une prestation dans le cadre d'un projet AEP réalisé par un Maitre d'Ouvrage public, passe par la sélection d'un (ou plusieurs) prestataire (s) via un ou plusieurs Appel (s) d'Offre (AO). Un Appel d'Offres de base sur un Dossier d'Appels d'Offres (DAO) émanant de l'Avant Projet Détaillé.

Un Dossier d'Appel d'Offres comprend en général :

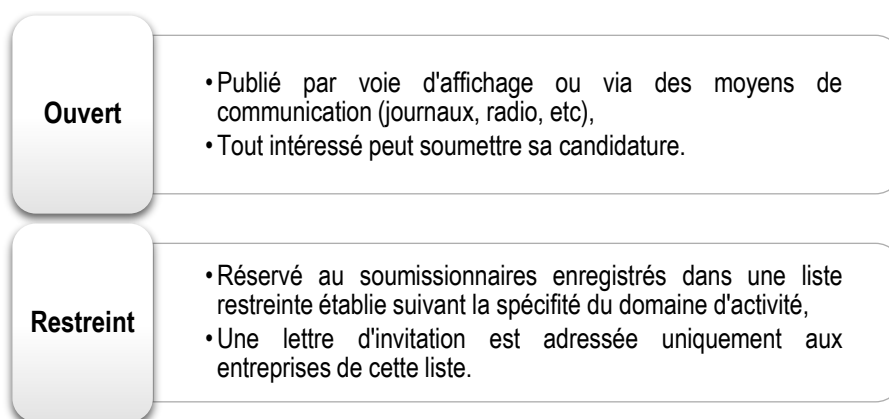
- Un appel à soumission
- Un formulaire de réponse, technique et financière
- Les modalités de sélection du gagnant, avec une grille d'évaluation précise
- Un cahier des prescriptions générales
- Un cahier des prescriptions spécifiques
- L'Avant Projet Détaillé du projet

Le DAO se présente sous forme d'articles donnant chacun plus de précisions sur l'offre pour éviter d'éventuelles ambiguïtés. Certains points doivent obligatoirement apparaître dans un DAO à titre d'exemple : la durée de validité, la langue de rédaction, critères d'évaluation et classement et la monnaie du marché.

Dans une vision de respect des principes de marché public, le DAO doit faire apparaître les dates, heures et endroits de l'ouverture des plis de candidature, doit souligner l'importance de la transparence avant, lors et après l'attribution du marché au candidat retenu, et doit veiller à publier la même information à tous les soumissionnaires au marché.

Lancement de l'Appel d'Offres

Une fois préparé, un Appel d'Offres est diffusé sous deux formes possibles :



Dans la région Atsimo Andrefana, après la réception des réponses des soumissionnaires, la DREAH AA se charge de constituer une commission présidée, par un représentant de la commune concernée. Le reste de la commission est composé des représentants de la DREAH AA et des partenaires techniques et financiers.

Le jury procède d'abord à la vérification de la conformité administrative des offres reçues de chaque soumissionnaire à partir des pièces justifiant son activité (photocopie certifiée de la carte professionnelle et statistique, certificat de non faillite, attestation de registre de commerce, etc.) Ensuite, la commission traite l'offre technique en évaluant les critères fixés dans l'appel d'offres qui tiennent compte de l'expérience du soumissionnaire dans la région et dans les domaines souhaités, ses actifs (capital et chiffre d'affaires), sa méthodologie de gestion de la prestation, ses équipes, ses matériels et équipements, etc.

Une note technique (NT) sur 100 est alors attribuée à chaque soumissionnaire à l'issue de cette évaluation. Les soumissionnaires ayant eu une note supérieure à une note minimale indiquée dans le DAO, seront convoqués pour ouvrir, en public, leur offre financière.

En général, la note financière (NF) est basée sur le principe que l'offre la moins disante (moins chère) est l'offre la mieux notée. La note financière

- *Note de la proposition la moins disante (PMD) = 100*
- *Note Proposition B = 100 x PMD / Proposition B*
- *Etc...*

Une note globale (NG) est attribuée à chaque soumissionnaire à partir d'une pondération des notes technique et financière de chaque soumissionnaire. Par exemple

$$NG = 70\% NT + 30\% NF$$

Sur cette base, sont classés les candidats. Le candidat retenu sera alors celui classé le premier. La liste de classement des soumissionnaires est préservée par la commission pour s'y référer en cas de besoin.

5.5.2 Négociation

Le candidat sélectionné est appelé à assister à une réunion de négociation au cours de laquelle il présente des compléments d'informations ou des commentaires sur son offre. A l'issue de cette réunion la commission conclut quant à la signature ou non d'un contrat avec le soumissionnaire retenu. Si la négociation n'aboutit pas, le deuxième soumissionnaire est invité pour négociation.

5.5.3 Contractualisation

Un contrat est un document justificatif de la présence d'une convention entre les parties contractuelles. Il se présente sous forme d'articles définissant chacun un volet du marché. Pour le cas d'un contrat de prestation, il doit décrire clairement toutes les dispositions à respecter par les parties signataires afin d'éviter toute ambiguïté susceptible d'être rencontrée lors de la prestation.

Un contrat de prestation comprend :

- La définition complète des parties prenantes, donneur d'ordre et prestataires
- Les attendus, c'est-à-dire les étapes préliminaires qui ont amené au contrat
- La définition du contour du contrat, les pièces constitutives du contrat
- L'objet et les objectifs du contrat
- Les engagements des parties impliquées
- Le volet financier, montant du contrat, étalement des paiements, modalités de décaissement
- Les modalités de réception des travaux, réception provisoire et définitive, les conditions de garantie
- Les conditions de rupture ou de fin de contrat
- Les modalités de règlement des litiges
- Les signatures
- Les annexes

En cas de problème, le contrat constitue une référence pour assurer les droits de chaque partie. Il est possible parfois de résilier un contrat en cas de non-respect de ses dispositions de la part d'une partie.

Lors de la réalisation du forage du réseau d'AEP à Ankililoaka, l'entreprise contractée a foré au point le plus favorable au sein de la commune. A la fin de la prestation, l'ouvrage réalisé ne respectait pas les spécifications attendues et l'entreprise ne pouvait régler le problème rencontré. Par conséquent, le MO était dans l'obligation de résilier le contrat.

Lors des travaux de construction du réservoir d'Ankililoaka, le bureau d'étude retenu a accepté de commencer les travaux sur la base d'un design non validé par le MO. Après vérification, il s'est avéré que ce design prenait en compte certaines mesures non justifiées. Le chantier ayant été déjà

commencé, des surcoûts ont été générés. Après plusieurs tentatives de la part de la DREAH AA pour régler le problème, cette dernière se trouvait obligée de résilier le contrat du bureau d'études.

5.5.4 Dossier d'exécution

Le dossier d'exécution est un document établi par l'entreprise de travaux contractée dans lequel sont énoncés : la méthodologie de travail, la liste des matériels et du personnel affectés au chantier, le bordereau de détails quantitatif et estimatif des travaux, le planning d'exécution, le planning d'approvisionnement en matériaux, les schémas d'installation des accessoires hydrauliques, les plans du réservoir, des kiosques, du plan du réseau et des profils en long vérifiés. De plus, l'entreprise de travaux est dans l'obligation de fournir une note de calcul à l'issue d'une étude de vérification de la stabilité du réservoir, de ses dimensions et de son ferrailage ainsi de réaliser des relevés topographiques des différents points du réseau. Le dossier d'exécution est à fournir avant le commencement des travaux.

Avant de commencer les travaux, la DREAH AA veille à organiser une réunion de démarrage des travaux en présence de la commune concernée, du partenaire technique et financier (Experts-Solidaires par exemple), du bureau d'étude et de l'entreprise de travaux pour une mise au point et la validation des dernières versions des documents du bureau d'étude et de l'entreprise de travaux.

5.5.5 Déroulement des travaux

En général, l'entreprise de travaux mobilise deux types d'équipes lors des travaux de réseau AEP.

Equipe Génie civil : pour réalisation des travaux de réservoir, kiosques, abri groupe, clôture du réservoir et si nécessaire réhabilitation d'un réservoir

Equipe des travaux hydrauliques : pour travaux de raccordements des ouvrages par conduites et accessoires.

Pour mener à bien ces missions, l'entreprise doit mettre en place un conducteur de travaux, chef de chantier, un topographe et des ouvriers (charpentiers, maçons, ferrailleurs, plombiers solidement expérimentés).

Après finalisation des travaux, l'entreprise procède à un test de mise en eau en conditions réelle afin de vérifier le fonctionnement du réseau et l'étanchéité du réservoir. L'équipe hydraulique entame aussi des travaux de purge pour enrayer l'existence de l'air dans les conduites et de saleté.

5.5.6 Suivi et contrôle des travaux

Lors des travaux, le bureau d'étude affecte un contrôleur de travaux, en permanence sur le chantier, pour suivre l'ensemble des travaux, et vérifier le respect des dispositions du cahier des charges. Par ailleurs, il doit informer le MO de tout changement prévu et attendre son accord avant de commencer les travaux. Il tient à jour un cahier de chantier disponible pour les différentes parties prenantes.

L'entreprise de travaux ainsi que le bureau d'études sont dans l'obligation d'informer le MO des dates des points d'arrêt que sont les grandes étapes des travaux par exemple : finalisation des fouilles des

fondations, ferrailage des infrastructures majeures, coulage du béton des fondations et des ceintures, finalisation des tranchées du réseau, pour qu'il puisse les suivre via un agent de son équipe.

En Atsimo Andrefana, durant la phase des travaux, on peut faire face à certains problèmes en grande majorité d'ordre logistique. En effet, les sites étudiés sont le plus souvent situés très loin de la ville de Toliara, ce qui pose des problèmes d'approvisionnement en matériaux et matériels nécessaires pour les travaux. Des fois, de fortes précipitations engendrent un blocage de la route qui est majoritairement en piste. Les camions (chargés de matériaux et matériels) se trouvent des fois en difficulté pour se rendre sur le site. L'entreprise de travaux est alors amenée à gérer les imprévus et adopter une approche d'anticipation pour remédier à ce problème.

5.5.7 Réception provisoire et définitive

Les réceptions sont les étapes permettant de valider la bonne réalisation d'un chantier.

La réception provisoire a lieu à la fin du chantier, quand l'ensemble des infrastructures a été installé. Cette réception consiste à vérifier la présence et le fonctionnement de toutes les installations par rapport aux spécifications techniques attendues. Le réseau est alors mis en service et testé pendant une à trois journées selon les dispositions contractuelles. Sont particulièrement contrôlées :

- Le dispositif d'exhaure (pompe et système d'énergie) qui doit fournir le volume d'eau attendu
- Le réservoir, qui ne pas fuir
- Le réseau, dont on vérifie la mise en pression (la pression doit rester constante en l'absence de tirage)
- La distribution ; test des bornes fontaines, kiosques et branchement privés installés)

Si le réseau n'est pas conforme, la réception provisoire est reportée jusqu'au fonctionnement parfait de l'installation. Si une avarie apparaît après la réception provisoire, celle-ci doit être corrigée à la charge du constructeur.

La réception définitive a lieu en général un an après la réception provisoire ou selon, les cas, un an après la dernière réparation effectuée par le constructeur. Elle sanctionne l'usage normal du réseau et transfère la responsabilité complète du système à l'exploitant. La réception définitive libère la retenue de garantie (en général de 5 à 10%) du maître d'ouvrage envers le constructeur. Toutefois, si un défaut est constaté pendant la réception définitive, celle-ci est repoussée jusqu'à résolution complète du défaut constaté.

En Atsimo Andrefana, dans le village d'Ambahikily, on constate qu'après un an de fonctionnement, l'entreprise de construction n'a toujours pas répondu aux injonctions de refaire l'enduit à l'intérieur du château d'eau, car ce dernier se détériore et des traces de peinture grises sont parfois présentes dans l'eau. La DREAH a donc bloqué la retenue de garantie du constructeur et refusé de prononcer la réception définitive. Devant l'incapacité du constructeur, la DREAH AA a décidé d'utiliser une partie du montant de la retenue de garantie pour effectuer les travaux par un autre prestataire.

6 Calculs de dimensionnement

Le dimensionnement et le choix des composantes techniques d'un réseau AEP requièrent la détermination de certains paramètres qui constituent les bases du projet. On rappelle que lors des études d'APS, une analyse des données (climatiques, sociales, démographiques, économiques, etc.) doit donner une première idée sur les valeurs numériques des besoins journaliers, débit de pompage de la ressource en eau et des options techniques susceptibles d'être adoptées au cours du projet. Ces valeurs sont revues lors des études d'APD. Le coût final du projet est estimé sur la base de leurs valeurs finales approuvées par le MO. Cette partie du rapport explicitera la manière avec laquelle on peut déterminer les valeurs de certains paramètres de choix et dimensionnement d'un projet AEP.

6.1 Calcul des besoins journaliers d'eau potable

Pour calculer le besoin journalier d'une commune, il faut connaître le nombre de ses habitants ainsi la consommation journalière nécessaire par habitant.

6.1.1 Nombre d'habitants

Dans certaines communes, ces données ne sont pas disponibles car les mairies ne disposent pas d'archives sur les données démographiques (nombre de naissance, de décès, nombre d'habitants, taux d'accroissement², etc). Une estimation du nombre d'habitants doit alors être faite en se basant sur les résultats des enquêtes sociales auprès de la population étudiée. Si ces enquêtes ne sont pas fiables, un comptage physique peut être nécessaire, des enquêteurs passant dans chaque maison demander le nombre d'habitants. Une approche par comptage des maisons sur Google Earth est aussi possible.

Etant donné qu'un projet d'AEP doit satisfaire les besoins d'une population à un horizon donné, le dimensionnement du réseau doit considérer le nombre d'habitants à cet horizon. Il est déduit à partir de la formule :

$$N = N_0 * (1 + t)^n$$

N : nombre d'habitants à l'horizon voulu

N_0 : nombre d'habitants à l'année de base

t : taux d'accroissement de la population

n : écart d'années entre l'année de projection et l'année de base

Le taux d'accroissement (t) est dans la plupart des cas pris égal à sa valeur régionale ou nationale.

A Ambahikily, en 2014, pour estimer le nombre d'habitants, la DREAH AA a croisé trois méthodes

² Taux d'accroissement : pourcentage de croissance de la population

- *Utilisation des données du dernier recensement et application d'un taux de progression démographique de 2,8% par an (celui du pays)*
- *Comptage des maisons sur Google Earth et application d'un ratio de 5,7 habitants par maison (ratio relevant de l'étude socio économique conduite pendant l'APS)*
- *Puis finalement un comptage physique des maisons avec relevé du nombre d'habitants par maison*

Sur cette base il a été constaté que le relevé physique était proche de l'estimation faite à partir de Google Earth, et inférieure à celle estimée à partir des données du recensement.

6.1.2 Estimation de la consommation journalière par habitant

Pour le cas des communes n'ayant jamais bénéficié d'un réseau d'AEP, la consommation journalière par habitant est souvent difficile à estimer. Elle peut être déduite à partir de la consommation des communes voisines ayant les mêmes caractéristiques (habitudes, type d'accès à l'eau, etc)

Les enquêtes sociales effectuées permettent d'étudier aussi les comportements des ménages quant à l'utilisation de l'eau et déduire ainsi le taux d'accès aux points d'eau du réseau et leur pouvoir d'achat.

Les enquêtes sociales doivent permettre d'approcher au mieux la quantité et la provenance d'eau par usage (boisson / cuisson ; lavage corporel ; lavage vaisselle et linge ; autres usages) pendant les saisons sèches et pluvieuses.

Dans cette enquête, une grande distinction doit être faite entre la consommation d'eau gratuite et la consommation payante de l'eau, car le prix de l'eau est un frein à son utilisation, et elle est souvent limitée à l'eau de boisson / cuisson.

Volonté de payer l'eau

Pour déterminer la volonté de payer l'eau au futur réseau, plusieurs moyens sont possibles :

- Evaluer le budget existant consacré à l'eau (achat, traitement de l'eau, transport...) et faire une projection de volume en fonction de tarifs estimé du nouveau système
- Interviewer les habitants, de manière descendante, sur le budget qu'ils seraient prêts à mettre dans l'accès à de l'eau propre, et pour quels usages.
- Comparer avec des lieux et système similaires d'adduction

Capacité de payer

La capacité de payer se définit par rapport au budget maximum à affecter à l'eau par les familles. Ce budget est fonction des priorités de dépenses des familles, définies lors de l'enquête socio économique. Il est communément acquis que le budget consacré à l'eau ne doit pas dépasser 3% des dépenses totales d'une famille

Les normes

De nombreux pays définissent des normes de consommations à respecter lors de la conception d'un système d'eau, en milieu rural ou en milieu urbain.

A Madagascar, la dotation journalière selon la norme est fixée à 30 l/j/pers. L'expérience montre que cette dotation est fortement surestimée. En effet, les projets d'AEP réalisés jusqu'à présent dans la région Atsimo Andrefana montrent que la consommation journalière ne dépassent pas les 7 l/j/hab au niveau des bornes fontaines (BF) et 15 l/j/hab au niveau des branchements privés (BP).

Pour éviter des problèmes techniques lors de la mise en service d'un réseau d'AEP (dépôt de particules, etc), la maîtrise d'œuvre doit opter pour la meilleure méthode qui permet de s'approcher aux consommations réelles.

Taux d'utilisation et adoption progressive

Le taux d'utilisation se base sur la perception des habitants sur le nouveau service. Lors de l'enquête socio économique, il est demandé aux habitants s'ils seront à même d'utiliser le nouveau service. On tient alors compte d'un coefficient d'adoption progressif du nouveau système.

Le type de distribution

La relation entre le mode de distribution et la consommation est lié, notamment autant pour des raisons techniques, logistique que socio-économiques. Ainsi la consommation d'eau moyenne à une borne fontaine est inférieure à celle d'un branchement privé. Des estimations peuvent être prises sur des raisons existants.

Consommations particulières

Puisqu'au sein d'une commune il existe des consommations unitaires particulières, il est pertinent de les étudier indépendamment des consommations journalières des habitants. En effet, il s'agit des entreprises, petits commerces, centres de santé, écoles, gargotes, hôtels et d'autres organismes particuliers.

En Atsimo Andrefana, des chiffres standards sont considérés pour les usages suivants :

Structure	Consommation
Ecole	1 l/j/élève
Centre de santé	10 l/j/lit
Hôtel	200 l/j/hôtel
Gargote	100 l/j/gargote

En résumé le calcul de la consommation journalière dépend de plusieurs hypothèses et facteurs, dont on peut ajuster la prise en compte. A défaut, ou si c'est obligatoire, on se réfère à la norme imposée.

A titre d'exemple à Ambahimahavelo, il a été adopté les hypothèses suivantes :

- Une consommation de 15 litres par personne par jour aux branchements privés la première année avec une augmentation additionnelle de 1 l/j/hab pour atteindre 20 l/j/hab dans 5 ans.
- Un taux d'utilisation des bornes fontaines de 40% la première année avec une augmentation de 2,5% par an compte tenu d'une augmentation de la population de 2,8% par an, pour atteindre 75% dans 15 ans.

- Un taux d'utilisation des bornes fontaines de 3% la première année avec une augmentation de 1% par an à Ambohimahavelo, pour atteindre 15% dans 13 ans, et une augmentation de 0,5% par an dans les villages du village d'Ambiky, pour atteindre 10% dans 15 ans.
- Les consommations des gargotes et des établissements scolaires ont été incluses dans les consommations aux branchements privés.

Ces hypothèses ont été justifiées par l'étude socio-économique faite au niveau de la commune

6.2 Calcul du volume à servir (VS)

Pour calculer le volume journalier à servir (VS) on multiplie la consommation journalière prévue par le nombre d'habitants, et on y ajoute les consommations particulières

Progression démographique

Ce volume à servir est augmenté chaque année du Taux attendu d'augmentation de la population : T

- $VS \text{ année } 2 = VS \text{ Année } 1 \times T$
- $VS \text{ Année } 3 = VS \text{ Année } 1 \times T \times T$
- $VS \text{ année } N : VS \text{ année } 1 \times T^{\text{puissance } N}$

Définition de l'horizon 'N'

L'horizon 'N' est la période de temps estimée d'utilisation du système qui va servir à dimensionner les infrastructures.

Sur les projets d'Atsimo Andrefana, N est fixé à 15 ans

6.3 Calcul du volume à pomper (VP)

Le volume à pomper est le volume à servir divisé par le taux de rendement attendu du système : R

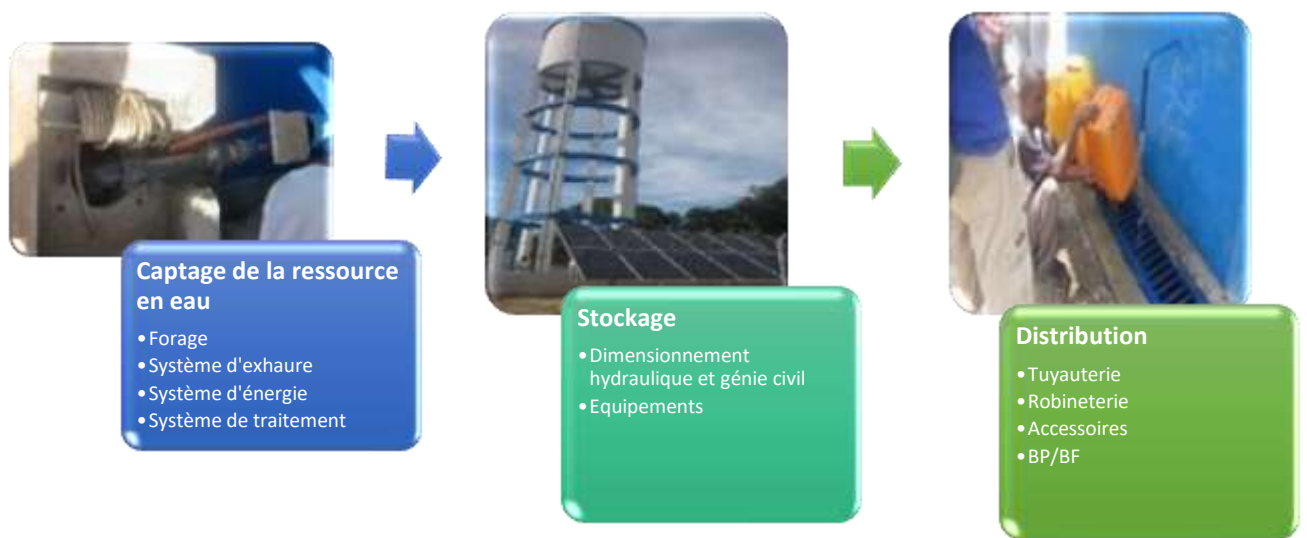
- $VP = VS/R.$

Ainsi q si le VS est de 100 m³, et le rendement du réseau est de 90%, le volume à pomper par jour sera de 111 m³/jour

7 Composantes techniques

Le bon choix des éléments techniques d'un projet AEP constitue une composante déterminante dans la réussite du fonctionnement du réseau. En effet, un réseau d'AEP doit d'abord être bien conçu techniquement et bien construit tenant en compte toutes les exigences du site en question. Cette partie du rapport étudie le dimensionnement et la mise en œuvre de l'ensemble des composantes techniques nécessaires pour la réalisation d'un réseau d'AEP. Les 3 composantes majeures du réseau sont les suivantes :

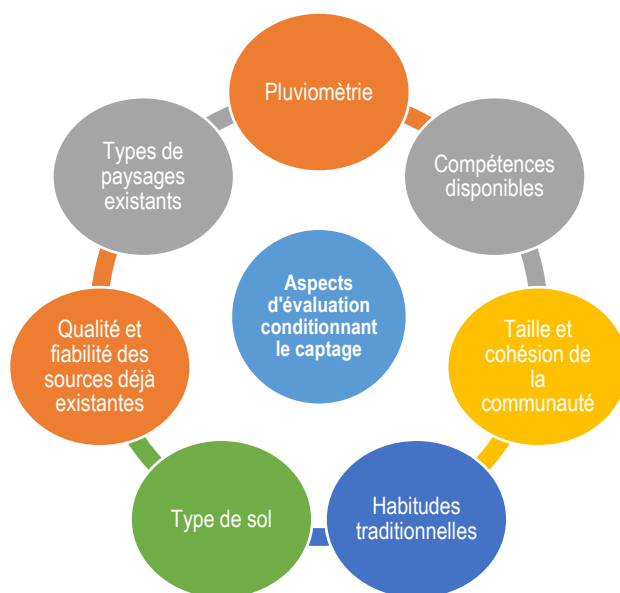
7.1 Captage



Le captage est l'opération qui consiste à prélever la ressource en eau pour alimenter un réseau. Le captage de l'eau peut se faire soit à partir d'une ressource en eau de surface soit à partir de ressources en eau souterraines.

7.1.1 Choix du type de captage

Le choix du type de captage passe par une évaluation de certains critères.



Pour choisir le système de captage le plus adapté au site étudié, le concepteur doit analyser tous les critères d'évaluation et considérer les avantages et inconvénients que représente chaque type de captage (cités ci-dessous).

	Types	Avantages	Inconvénients
Eaux de surface	Source de surface, Résurgence	Eau de surface de bonne qualité peu onéreuse	Nécessite un pompage si elles se trouvent à un niveau bas, Exposée à la pollution (rejet direct, défécation, etc.) Peut nécessiter un traitement pour adapter les paramètres physico chimique de l'eau aux normes en vigueur Pas un modèle standard de ce type de captage La population accepte parfois difficilement leur exploitation en raison de critères socioculturels
	Rivière, Canal d'irrigation, barrage, lac	Volumes disponibles importants Moins onéreux	Exposée à la pollution (défécation, rejet domestique, etc.) donc le captage doit se faire en amont des habitations Peut nécessiter un traitement, ce qui entraîne des coûts d'exploitation élevés Doit s'adapter aux caractéristiques physiques du courant d'eau (vitesse, pente, etc.) en fonction de la période de l'année
Eaux souterraines	Puits	Faible complexité de réalisation Pompage facile	Exposé à la pollution (rejet direct de déchets, pollution de la nappe à cause de la défécation à l'air libre) nécessite un creusement du sol, peut présenter un danger aux usagers s'il n'est pas protégé Exploite la première nappe trouvée, possiblement polluée

	Forage	Fournit une eau de bonne qualité, stable et durable	Coût d'investissement élevé Complexe à réaliser (si l'on veut qu'il soit durable), Nécessite un dispositif de pompage conséquent
	Drains horizontaux	Adapté aux sites ayant une source avec zone d'émergence large et diffuse	Nécessité de protection contre l'érosion et de détérioration Veiller à ne pas cultiver le sol au-dessus des drains et qu'aucune végétation arbustive ou arborée ne s'installe à proximité

Au niveau de la région Atsimo Andrefana, la plupart des points d'eau sont basés sur des puits ou forages mais certains sites bénéficient de la présence de ressources d'eau superficielles. Une étude de faisabilité doit alors être faite pour conclure sur leur exploitation pour assurer l'alimentation en eau potable de la population à l'horizon souhaité. Ci-après sont présentés trois types de système d'exploitation de la ressource en eau mis en œuvre dans le cadre des projets d'Atsimo Andrefana :

7.1.1.1 Captage d'eau de source

Dans le cas où la source se trouve à une altitude haute par rapport au site à desservir, l'exploitation de cette source sera très pertinente puisque l'adduction se fera gravitairement et ne nécessitera pas d'apport d'énergie. Un traitement peut toutefois s'avérer nécessaire dans le cas où l'eau captée présente des paramètres physico-chimiques et/ou bactériologiques ne respectant pas les normes. (Voir partie « Système de traitement »).

Avant de décider du recours à une source au sein d'une commune pour l'approvisionnement en eau potable, il est essentiel d'étudier l'acceptation de ses habitants vis-à-vis de ce type de ressource en eau et de s'assurer que la source à exploiter ne présente aucun caractère sacré ou culturel dans la commune.

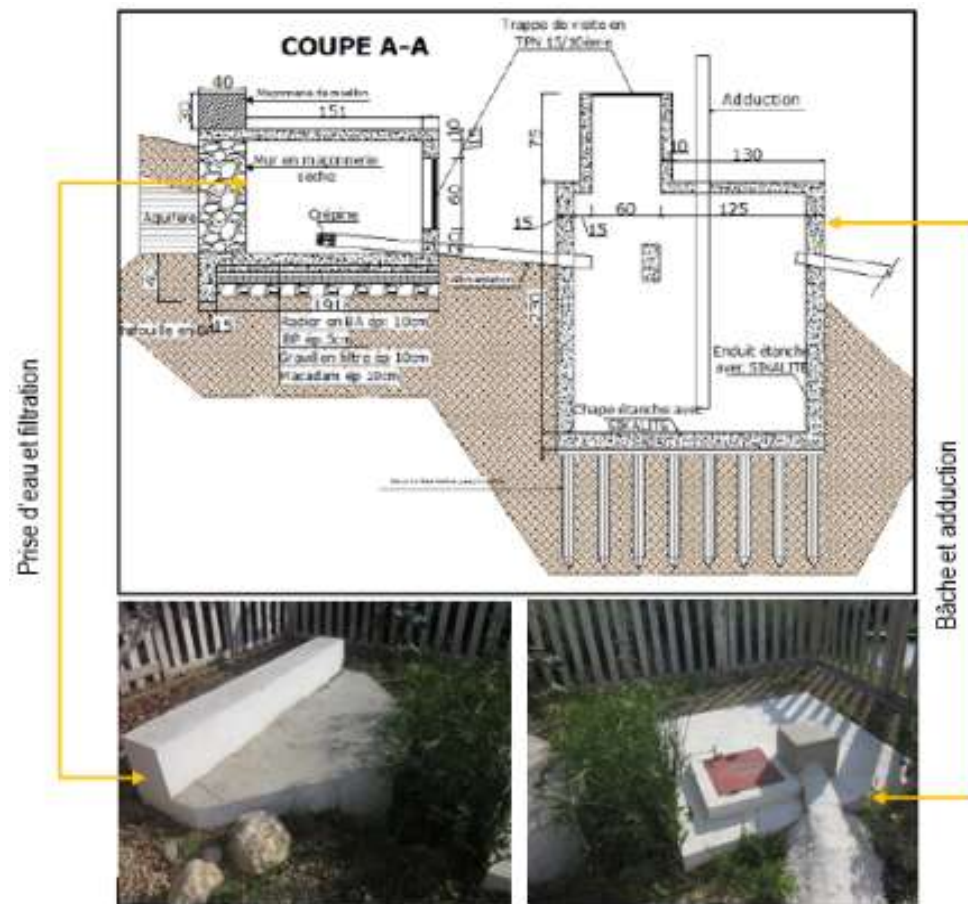
Dans le village d'Ambiky (Commune d'Ambohimahavelona) un captage de source a été mis en place pour l'approvisionnement en eau potable. Ce village est caractérisé par la présence d'une douzaine de sources. Une étude d'avant-projet, conduite en 2015, a recommandé de capter l'eau à partir de la résurgence³ de ces sources. Après une étude du débit d'étiage de cette résurgence et de la qualité de son eau, il a été conclu que cette dernière satisfaisait largement les besoins de la population à l'horizon souhaité (15 ans soit 2030).

Un canal d'irrigation passe à proximité du point de captage envisagé. Afin d'éviter le mélange de l'eau de ce canal avec celle de la résurgence à capter, le bureau d'étude a proposé de mettre en place une imperméabilisation de la couche inférieure de la résurgence avec du béton armé étanche. De plus, une couche filtrante a été mise en place pour drainer et réduire la sous pression que peut provoquer l'eau du canal.

Pour installer la pompe nécessaire pour le captage de l'eau de la source, une bache (réservoir intermédiaire) a été mise en place. Elle a une forme carrée de côté 2m intérieur et de hauteur 1,5 m.

³ Résurgence : Réapparition de l'eau souterraine à l'air libre.

Comme cette résurgence est fortement exposée au risque d'infiltrations contaminantes, il a été décidé de couvrir l'ouvrage de captage par une dalle de béton et de mettre une couche de gravillons d'épaisseur 5 cm sur toute la surface intérieure de l'enceinte clôturée pour éviter un dépôt boueux.



7.1.1.2 Captage d'une eau de rivière

Le captage d'une eau de rivière peut être une solution adéquate pour alimenter un réseau. Les aspects suivants sont à considérer lors du choix de cette source :

- Débit le long de l'année,
- Qualité et turbidité de l'eau,
- Difficulté d'accès,
- Exploitation de l'eau de rivière pour d'autres usages,
- Risques de pollution par les animaux, les bateaux et rejets domestiques.

Par ailleurs, il est nécessaire de bien veiller à bien choisir le point de captage pour optimiser le pompage de l'eau.

7.1.1.3 Captage d'eau souterraine

Les principaux types de nappe sont :

- **la nappe libre** : c'est une nappe qui n'est pas limitée par une couche imperméable supérieure. Le niveau d'eau au niveau de chaque point de cette nappe est égale à son épaisseur saturée et la pression y présente est égale à la pression atmosphérique.

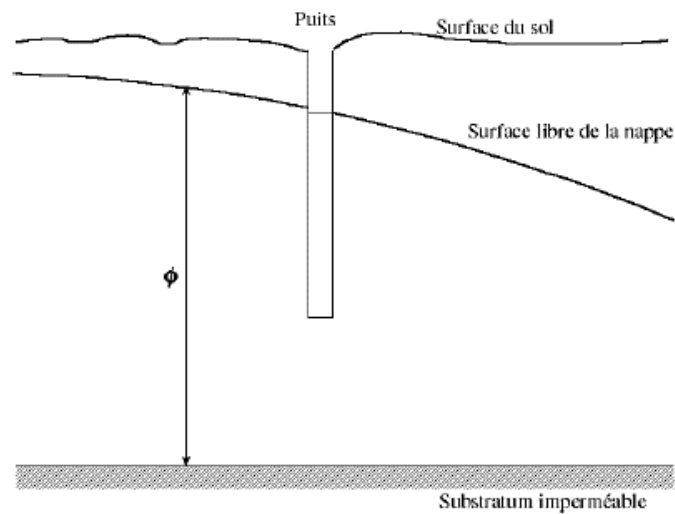


Figure 3 : Nappe libre

- **la nappe captive** : elle est surmontée par une formation peu perméable voire inexistante, par la charge hydraulique de l'eau qu'elle contient est supérieure à la cote de la nappe.

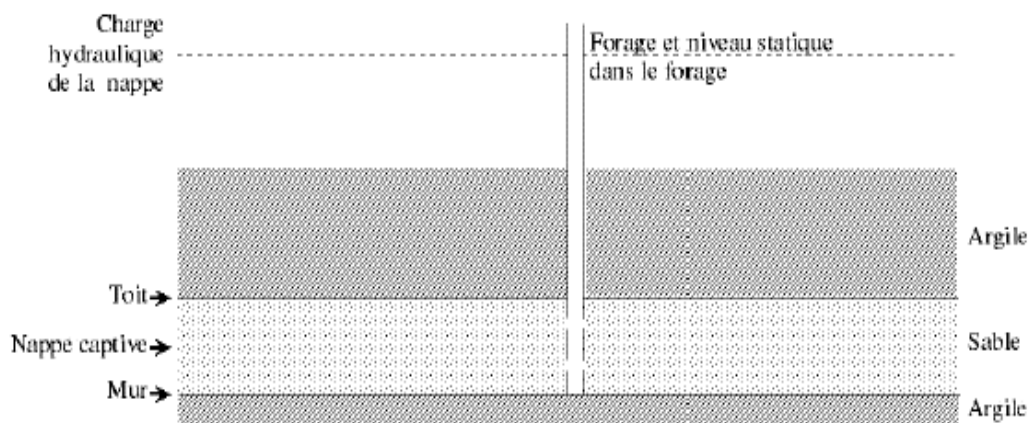


Figure 4 : Nappe captive

Du fait de l'exposition des eaux superficielles et des nappes libres à la pollution causée par la défécation à l'air libre ou par le rejet de déchets domestiques, la qualité de l'eau brute des nappes libres ne permet pas d'envisager une potabilisation de l'eau à un coût raisonnable. Il est donc préférable d'éviter l'exploitation des nappes de faible profondeur pour alimenter un réseau d'eau.



Figure 5 : Un habitant puisant de l'eau depuis un puits

La région Sud-Ouest de Madagascar connaît très peu de précipitations au cours de toute l'année (environ 341 mm par an à Tuléar), l'alimentation des ressources en eau superficielles se fait peu, ce qui explique la faible disponibilité des eaux de surface. De ce fait, une grande part de l'alimentation en eau potable de la région se fait à partir d'eau souterraine en profondeur.

Lors des études de maîtrise d'œuvre à Ambahikily, en 2013 et 2014, une mesure des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux a été faite au niveau des puits du village, et a conclu à des valeurs de conductivité électrique très élevées et à la conclusion que les eaux des puits étaient minéralisées et extrêmement polluées, leur exploitation était alors fortement déconseillée.

En conséquence, il a été décidé d'exploiter les nappes profondes qui permettent de satisfaire les besoins en eau, actuels et futurs de la population, quantitativement et qualitativement. Les études hydrogéologiques réalisées ont justifié ce choix.

La zone disposait déjà de forages réalisés dans le cadre d'un projet de la JICA (Coopération japonaise) dans les années 1990. Des coupes de forage avaient été réalisées à l'époque qui permettaient d'envisager la présence d'une nappe profonde aux alentours de 120 mètres de profondeur. Toutefois, une étude géophysique a été réalisée pour s'assurer de la présence d'eau dans le site à étudier. Pour exemple, ci-dessous est présentée la coupe du forage de Namatoa de coordonnées (21°36'54.31"S ; 43°37'44.37"E)

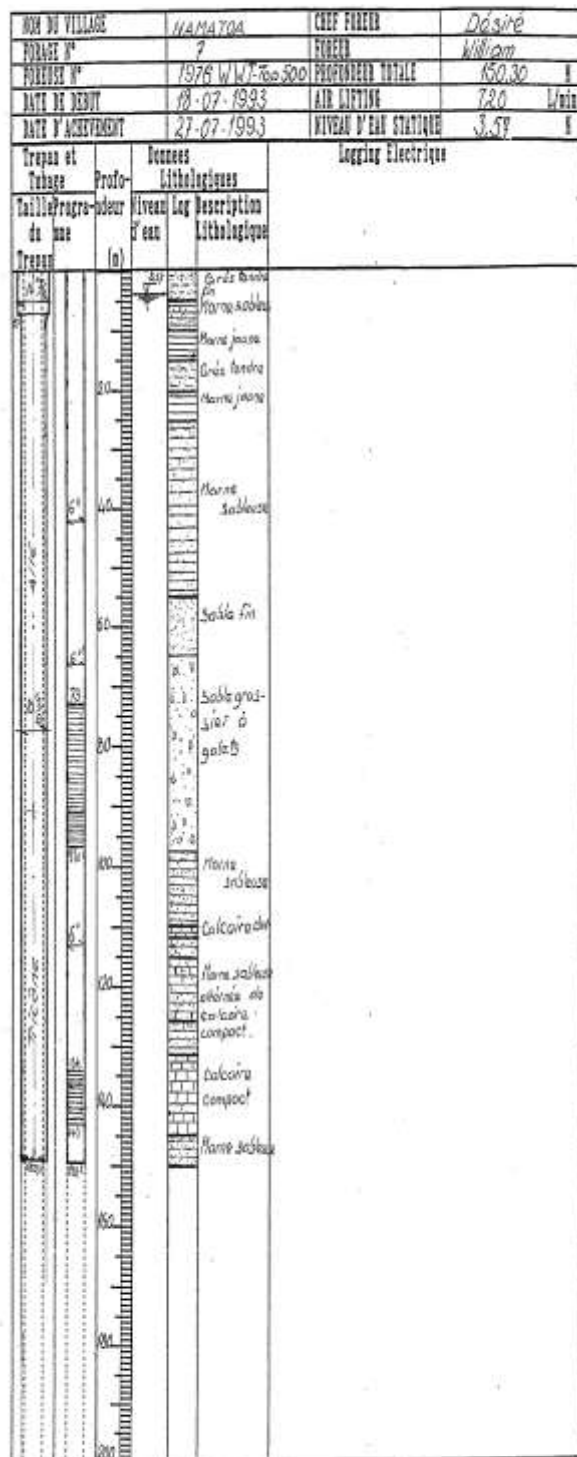


Figure 6 : Coupe du forage de Namatoa

7.1.2 Etude géophysique

Réaliser un forage est la solution qui permet de satisfaire les besoins d'une population en qualité et en quantité à long terme. Avant d'entamer les travaux de réalisation d'un forage, il est préférable d'effectuer une étude géophysique qui permet d'avoir des informations sur la nappe à exploiter, de limiter la zone favorable pour l'implantation du forage et d'estimer sa profondeur.

Cette étude est, en général, confiée à une entreprise spécialiste dans la reconnaissance des sols. Elle utilise des techniques de prospection et d'interprétation adaptées aux conditions du site étudié. Lors de la réalisation de cette étude, il est recommandé de faire appel à un géophysicien, un hydrogéologue et des techniciens.

Après analyse des situations hydrogéologique, géologique et climatique du site, le prestataire procède à la première étape de l'étude géophysique qu'est la photo-interprétation. Elle consiste en la prise d'une photo aérienne ou satellite du site et d'y identifier les entités observées (géologiques, morphologiques, végétales, etc.)

Ensuite on procède à la prospection géophysique qui permet de caractériser la structure, la nature des roches ainsi la présence et la qualité de l'eau. Des points de sondage sont choisis par le prestataire en collaboration avec le MO pour déterminer les points de sondage sur lesquels se basera la reconnaissance des sols.

Dans la région Atsimo Andrefana, les données de base pour des études géophysiques se trouvent au niveau de la DREAH AA. Néanmoins, pour se référer aux études déjà réalisés au niveau de la région et d'avoir la liste des forages qui y sont présents, les entreprises de forages de la région prévoient de mettre en place une banque de données regroupant tous les forages réalisés ainsi que les rapports et études correspondants.

Dans le cas des projets d'Ambahikily, Ankililoaka et Tanandava Station, on a utilisé des méthodes électriques à savoir le sondage électrique vertical et le trainé électrique. Ces méthodes reposent sur la mesure de la différence de potentiel créé dans un sol après injection d'un courant électrique au travers de deux électrodes immergées dans le même sol. La résistivité du sol est déduite à partir des deux paramètres (l'intensité et la tension).

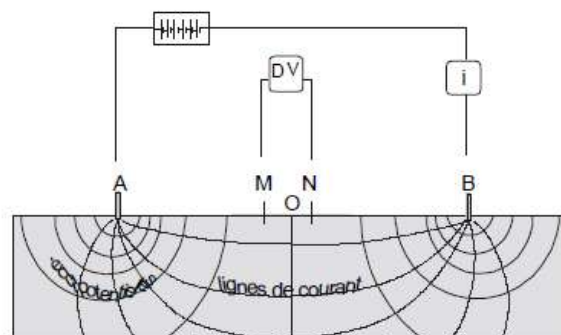


Figure 7 : Dispositif de mesure

Le sondage électrique permet d'avoir une succession verticale des résistivités apparentes autour du point investigué et de régler le dispositif du trainé électrique qui permet d'obtenir des profils en long des résistivités.

Les matériels utilisés lors des travaux de prospection sont : le résistivimètre et ses accessoires, des ordinateurs de terrain, appareil de localisation de point, boussole.



Figure 8 : Etude géophysique à Ankililoaka

Traitement des données

Pour interpréter les résultats des sondages réalisés, on peut faire appel à des logiciels comme le logiciel Qwseln. Il s'agit d'un logiciel qui permet d'interpréter les résultats des sondages réalisés en faisant rentrer les valeurs de l'écartement inter-électrodes et les valeurs de résistivité apparente associée. En supposant le nombre de couches, leur résistivité apparente et leur épaisseur, un modèle tabulaire est généré que le logiciel raffine ensuite automatiquement.

Le logiciel Qwseln permet d'avoir comme donnée de sortie des graphes présentant la résistivité ($\Omega.m$) en fonction de l'épaisseur des couches (m). De plus le logiciel répertorie le nombre de terrains que le modèle propose ainsi que leur résistivité et l'épaisseur correspondante.

Le point le plus favorable parmi les profondeurs traversées par le courant est le point présentant la plus faible valeur de résistivité. En effet, plus l'eau est minéralisée plus sa conductivité électrique est importante, autrement dit sa résistivité est faible. Par ailleurs, en vue d'optimisation du coût de réalisation du forage, il est judicieux de choisir le point permettant de capter le débit souhaité le moins profond possible.

Il est à rappeler que le logiciel Qwseln donne les résistivités apparentes de à chaque puissance (épaisseur) de l'aquifère prospecté en tenant en compte l'effet des résistivités au-dessus. Pour connaître à quelle profondeur se trouve chaque valeur de résistivité, il convient d'additionner la valeur des épaisseurs des couches se trouvant au-dessus.

Le géophysicien présent sur place analyse les résultats des graphes de l'étude géophysique et décide du point optimal pour l'implantation du point de captage et de sa profondeur. En effet, le point d'inflexion de la courbe du graphe permet de conclure quant à la position du substratum au niveau du point investigué et d'arrêter par conséquent l'investigation.

A l'issue de cette étude, l'entreprise en charge produit un rapport d'activité faisant figurer les points résultats des sondages réalisés sur site et les coordonnées du point le plus favorable de l'implantation du forage parmi les points investigués.

Pour le cas d'Ambahikily, l'équipe chargée de faire l'étude géophysique a mis 3 jours pour finaliser l'étude. Quatre sondages ont été faits. Ils ont permis de conclure que le sous-sol est composé d'une nappe superficielle se trouvant à moins de 2m de profondeur avec une puissance très limitée. Une nappe profonde a été également identifiée, située sous la formation marneuse supportant la nappe superficielle. Son toit est localisé entre 120 m et 160 m de profondeur.

L'interprétation des résultats des quatre sondages a conclu que l'implantation du forage optimale était celle ayant la courbe de sondage ci-dessous. En effet, ce point est moins profond avec une valeur de résistivité très importante. Le débit y était estimé entre 5 et 9 m³/h et la profondeur du forage prévue à l'issue de cette étude était de 140 m.

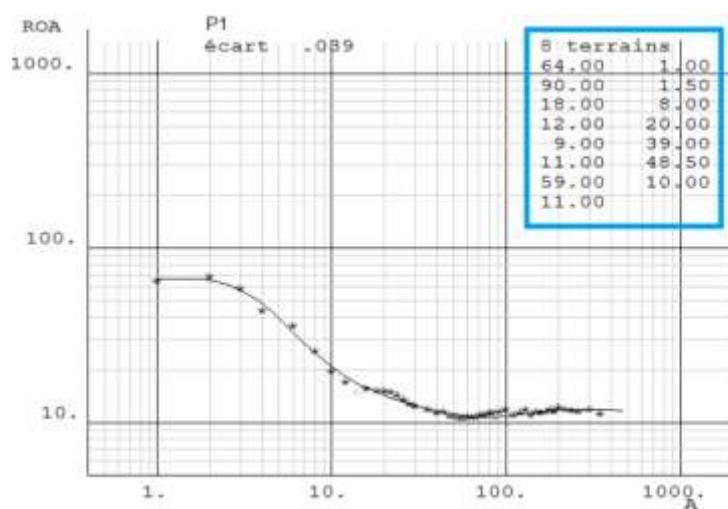


Figure 9 : courbe de sondage électrique du point le plus favorable

L'abscisse de ce graphe donne les valeurs des altitudes tandis que l'axe des ordonnées présente la résistivité. L'encadré en bleu présente la valeur de résistivité correspondante à chaque profondeur. Cependant pour connaître la valeur de résistivité résultante à une profondeur donnée, il faut ajouter les résistivités des couches précédentes.

Au niveau de la commune d'Ankililoaka, deux nappes ont été investiguées, une nappe superficielle à moins de 3 m de profondeur exposée à la contamination et une nappe profonde localisée entre 70 m et 85 m avec une valeur de résistivité égale à 40 Ω m. Il a été estimé que la profondeur du forage à implanter serait égale à 100 m pour prendre une marge d'incertitude. Deux points ont été retenus sur cette base en tenant compte d'un espace de sécurité de 10 mètres. Le point initial retenu pour l'implantation du forage dans le cas d'Ankililoaka a été déplacé légèrement à cause du conflit d'appropriation du terrain. Du fait de la sub horizontalité de la nappe dans la zone d'étude, le déplacement n'a pas affecté le résultat escompté.

A titre informatif, le tableau ci-dessous renseigne sur les aquifères attendus à Ankililoaka et du débit de pompage estimé en fonction de la profondeur forée.

A1	Existence d'une nappe aquifère d'une grande productivité est attendue à une profondeur inférieure à 20m	Débit au pompage attendue plus de 200l/min (12 m ³ /h)
A2	Existence d'une nappe aquifère d'une grande productivité est attendue à une profondeur de 20 à 100m	
A3	Existence d'une nappe aquifère d'une grande productivité est attendue à une profondeur de 100 à 250m	

B1	Existence d'une nappe aquifère d'une productivité moyenne est attendue à une profondeur inférieure à 100m	Débit au pompage attendue 50 à 200l/min (3m3/h à 12m3/h)
B2	Existence d'une nappe aquifère d'une productivité moyenne est attendue à une profondeur de 100 à 200m	
C	Une nappe locale et discontinue existe dans une profondeur de moins de 20m , y compris formations lenticulaires	
D	Aucune formation de nappe importante n'existe à une profondeur de 250m au niveau du sol (site difficile pour le développement des eaux souterraines)	

7.1.3 Conception et équipement d'un forage

La réalisation d'un forage requiert la détermination de son diamètre, de sa profondeur, et du débit attendu de pompage. Ils sont estimés à l'issue de l'étude géophysique et peuvent être modifiés lors des travaux de réalisation du forage puisqu'ils dépendent du sol traversé et de la productivité des nappes captées.

Il est à rappeler que la productivité d'un aquifère est fonction des caractéristiques physiques du sous-sol traversé, en particulier du coefficient d'imperméabilité K et de la section d'arrivée d'eau S . En effet, le débit de captage varie proportionnellement à ces deux paramètres :

$$Q \text{ (m}^3/\text{s)} = K \text{ (m/s)} * S \text{ (m}^2\text{)}$$

Dans la pratique, il est difficile d'estimer ces paramètres physiques avant de procéder au creusement du forage. C'est pour cela que la profondeur initiale du forage peut être modifiée au fur et à mesure des travaux de creusement du forage. Comme le forage est un ouvrage cher et difficile à réaliser, il est recommandé de bien le dimensionner pour optimiser son utilisation et son coût.

Le débit d'exploitation dépend essentiellement de la productivité de l'aquifère capté. Au cas où ce dernier ne permet pas de satisfaire le débit horaire initialement fixé, il convient de chercher une solution additionnelle pour répondre au besoin journalier de la population : augmenter la durée de pompage, utiliser un deuxième forage pour compléter le déficit du débit pompé, etc).

A Ankililoaka, la profondeur du forage était estimée à 100 m. Lors des travaux de foration elle a été réduite à 73, 6 m où a été rencontrée la couche calcaire. Les aquifères captés jusqu'à cette profondeur satisfont largement le débit d'exploitation souhaité estimé à 12 m³/h.

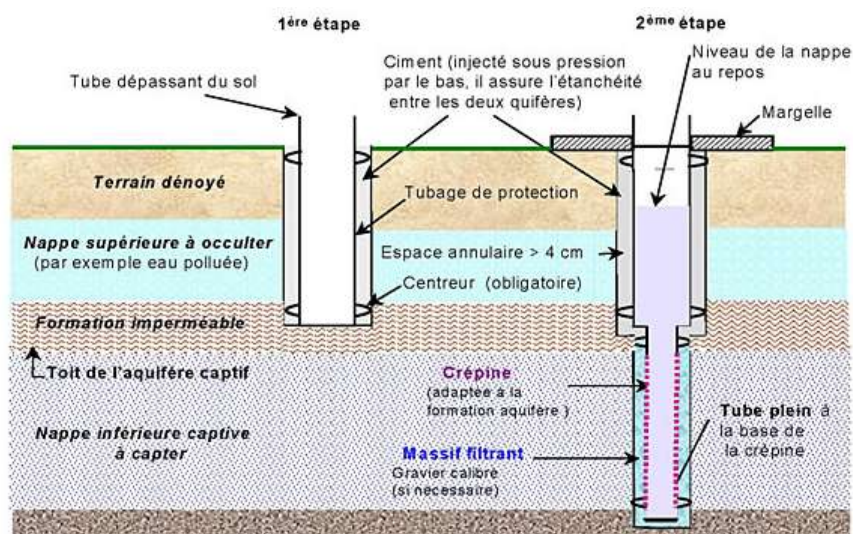


Figure 10 : Détails d'un forage traversant une nappe libre et captant une nappe captive

Source : BRGM d'après la plaquette « Des forages de qualité en région Centre »

7.1.3.1 Tubages

Pour capter les eaux au niveau des aquifères exploités, on utilise des crépines, qui sont des tubes perforés par où arrive l'eau. La dimension des ouvertures des crépines doit être déterminée par interprétation de l'analyse granulométrique du terrain étudié. En effet, la taille des fentes des crépines doit être plus petite que la taille moyenne des particules du sol. En présence de crépines avec une taille standard (en général 1 mm) des perforations, il est possible de les fabriquer en utilisant une scie.

Des colonnes de tubes pleins doivent être également mises en place au niveau des couches du sol où il n'y a pas de captage d'eau. Le diamètre des tubages doit être inférieur au diamètre du trou de foration (exemple : 8" pour un trou de foration de 6" et 6" pour un trou de 4")

La DREAH AA équipe les forages en général en 4,5", voire 6" pour gagner en débit d'exploitation. En effet, en augmentant d'un pouce on gagne jusqu'à 20% en débit.

Au niveau de la région Atsimo Andrefana, il est difficile de s'approvisionner en tubages de grand diamètre, c'est la raison pour laquelle a plupart des forages sont en 4,5"

7.1.3.2 Tube décanteur

Le tube décanteur est la partie se trouvant sous les crépines. Ce dispositif permet de faire déposer les particules fines contenues dans l'eau de forage. Il est accompagné d'un bouchon de pied qui sert de fermeture inférieure pour éviter la remontée de sable ou de boue. Le tube décanteur peut se présenter sous forme d'un tuyau PVC plat et le bouchon peut être réalisé en ciment. La profondeur estimée du forage doit tenir en compte la hauteur du tube décanteur et du bouchon. Cette hauteur dépend de l'envasement du forage.

A Ankililoaka, Il fut difficile de mettre en place un bouchon de pieds préalablement préparé en surface. L'entreprise de forage a décidé de réaliser le bouchon directement au pied du forage en injectant dans le forage des sacs plastique contenant du béton.

A Tanandava Station, l'entreprise de forage a choisi de mettre un bouchon en ciment d'une hauteur de 50 cm pour fermer le tube décanteur qui est de 3,38 m.

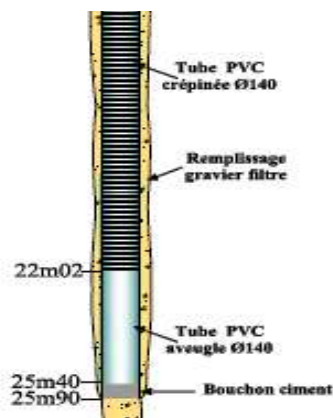


Figure 11: Tube décanteur et bouchon à Tanandava station

7.1.3.3 Massif filtrant

Afin de filtrer les particules fines et les empêcher de pénétrer dans le forage, un massif filtrant doit être mis en place, au niveau des zones de captage de l'aquifère, entre la crépine et la surface externe du trou de forage. La dimension du gravier utilisé dépend de la dimension des particules contenues dans l'eau captée et doit être légèrement plus grande que la largeur des fentes des crépines.

Dans la majorité des cas au niveau de la région Atsimo Andrefana, le massif filtrant est constitué du gravier de rivière siliceux roulé, de 2mm à 5 mm, tamisé, lavé et rincé.

Dans les zones d'Ialaka, d'Ankatsakatsa et de Sakaraha, il existe du gravier pour massif filtrant de bonne qualité. Les entreprises de forage dans la région Atsimo Andrefana s'y rendent afin de récupérer du gravier, après tamisage, pour l'équipement des forages, par contre les réserves commencent à épuiser suite à cette utilisation.



Figure 12 : situation géographique des trois zones

7.1.3.4 Joint d'étanchéité

Pour éviter que les eaux d'infiltration venant de la surface du sol ne viennent polluer l'aquifère exploité dans le forage, un joint d'étanchéité doit être mis en place de préférence sur 2 m au-dessus du massif filtrant. Il peut être assuré par de la bentonite, une argile naturelle qui se gonfle quand elle est humide.

A Tanandava Station, le joint d'étanchéité mis en place faisait une hauteur de 6 m située à 52 cm au-dessus de la crépine.

7.1.3.5 Equipement de surface

Pour protéger la tête du forage de toute détérioration possible (humaine ou naturelle), il est conseillé de mettre une protection de surface. Elle est mise en fin de tous les travaux et après réception des résultats des analyses d'eau.

Elle est dans la majorité des cas sous forme de margelle carrée, en général de côté 1,2 m et de 40 cm d'épaisseur réalisée avec 4 sacs de ciment et 3 barres de fer à béton (de 12 m de longueur et de 6 mm de diamètre).

A Ankililoaka, on a construit une margelle carrée de 1 m de côté et 30 cm d'épaisseur en béton armé dosé à 350 kg/m³ muni d'un cadenas.



Figure 13 : Tamisage du sable pour la margelle en béton



Figure 14 : protection de la tête de forage d'Ankililoaka

Dans certains sites d'implantation de forage, il existe un risque de crues qui peut endommager la tête du forage. Dans ce contexte, il est recommandé de construire un grand ouvrage en béton entourant la tête du forage.

A Ambohimahavelona, le terrain est de type altéré vallonné avec une déclivité très forte. Pour protéger le forage d'éventuelles crues, une protection en béton, faisant à peu près 1 m de hauteur, a été mise en place en plus d'un cadenas.



Figure 15 : Captage Ambohimahavelona

A Saint Augustin, l'emplacement du forage se situe à proximité d'un canal d'irrigation, c'est pour cela qu'on a pensé à une protection en béton cadénassée, décalée de 50 cm par rapport au niveau du canal.



Figure 16 : Canal d'irrigation et captage à Saint Augustin

A Ambahikily, la situation géographique du forage n'est confrontée à aucune contrainte naturelle, néanmoins le forage est situé à proximité du château d'eau. Une protection en béton a été mise en place avec un capot non cadenassé et une clôture en béton armé et grillage pour sécuriser son accès.



Figure 17 : Sécurisation du captage à Ambahikily

7.1.4 Matériaux utilisés pour équipement de forage

Pour garantir la bonne qualité et la pérennité de l'équipement d'un forage, il faut veiller à bien choisir les matériaux utilisés.

L'acier est un matériau résistant qui peut être utilisé pour équiper le forage, néanmoins il peut être corrodé par l'eau. On doit alors avoir recours à l'acier inoxydable mais son coût est très élevé.

Le PVC est donc le matériau le plus utilisé pour équiper un forage. Il présente l'avantage de la légèreté, de disponibilité, de non sensibilité à la corrosion et de coût faible par rapport à l'acier, par contre, il est fragile et ne doit pas être exposé au soleil avant sa mise en terre.

Les matériaux des crépines et tubages utilisés doivent répondre à une fabrication selon des normes bien définies (correspondant à une bonne durabilité et solidité) certifiées par le fournisseur.

La SMTP, certifiée ISO 9001 (utilisée par l'entreprise de forage d'Ankiloaka et Tanandava) est un fournisseur principal en matériaux de captage. Leurs tuyaux PVC sont fabriqués selon les normes ISO 1452-2 :2009, DIN 4925 et ISO4422-2 : 1996 qui répondent aux exigences de transport d'une eau destinée à la consommation humaine.

Concernant la cimentation : les entreprises de forage dans la région Atsimo Andrefana ont recours à utiliser des ciments achetés auprès des fournisseurs (HOLCIM, LION, LUCKY CIMENT, etc.)

Ci-après est présenté un exemple de schéma explicatif des composantes d'un équipement de forage, proposant par deux entreprises de forages différentes :

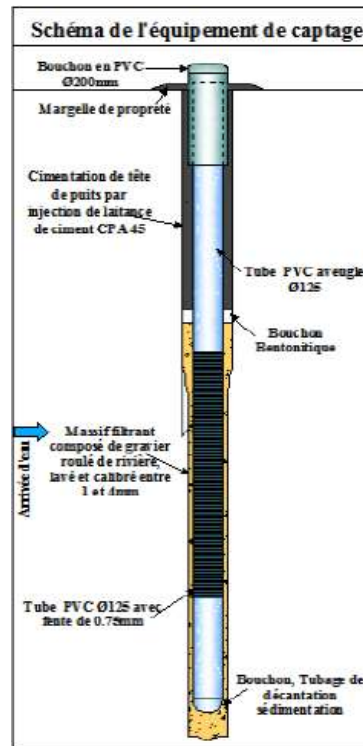


Figure 18 : exemple d'un équipement de forage

7.1.5 Périmètres de protection

Tout système de captage peut être confronté aux problèmes de pollution et de détérioration par les habitants ou par les conditions climatiques. En particulier, le forage ne doit pas constituer un facteur de pollution depuis la surface et entre nappes. Il est nécessaire de délimiter les zones de protection des systèmes de captage. Il existe trois types de périmètres de protection :

- Le périmètre de protection immédiate : inaccessible, il ne contient que les installations du captage. Estimé, en général, à quelques dizaines de mètre.
- Le périmètre de protection rapprochée : permettant de protéger le captage des infiltrations de polluants dans la nappe exploitée. Estimé, en général, à une dizaine d'hectares.
- Le périmètre de protection éloignée : sert à renforcer la protection contre les pollutions permanentes et diffuses. Il est facultatif.

Pour déterminer des trois délimitations, l'idéal est de réaliser une étude hydrogéologique qui permet de connaître les risques auxquels peut faire face le captage en fonction de la distance.

Cette étude est difficile à mettre en vigueur dans la région Atsimo Andrefana. Dans la pratique, et pour le cas d'un forage à proximité immédiate du réservoir, on entoure l'ensemble des ouvrages ainsi l'abri du système d'énergie avec un enclos fermé de 10 m par 10 m.

A Ankililoaka, où le forage se trouve loin du réservoir, la commune se charge de mettre des barrières à 10m du forage pour empêcher tout acte pouvant causer une pollution de la zone de captage. Dans le chef-lieu d'Ambohimahavelona, en absence d'un piézomètre à proximité qui aurait permis d'avoir une idée de l'étendue du cône de rabattement autour du forage, il a été préconisé de réaliser un périmètre de protection d'au moins 5 m autour du forage constitué d'une clôture fermée.

7.1.6 Réalisation d'un forage

La réalisation d'un forage dans les règles de l'art suit les étapes suivantes :

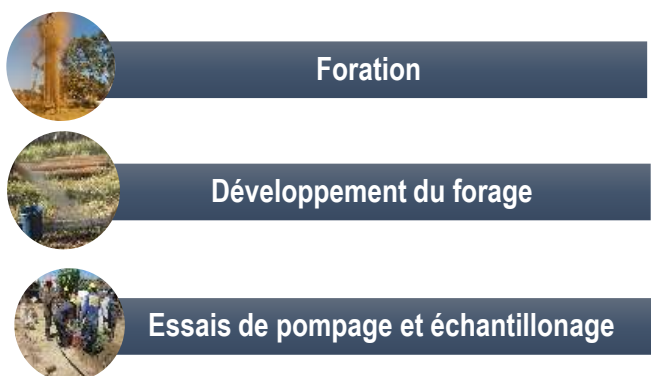


Figure 19 : Les étapes de réalisation d'un forage






Afin de tester le débit d'étiage et conclure sur la capacité d'un forage à satisfaire les besoins de la population, il est recommandé de réaliser les travaux de forage en période de saison sèche. Il faut rappeler que le commencement des travaux de forage nécessite la validation préalable du programme des travaux et des matériaux d'équipement du forage par le maître d'ouvrage (la commune). Ce dernier est prié d'informer la communauté bénéficiaire.

La présence d'un superviseur de travaux de forage, hydrogéologue spécialiste en la matière, est fortement recommandée lors des travaux de forage. Il a pour mission de s'assurer du respect des dispositions du contrat signé et de la prise des bonnes décisions par l'entreprise grâce à son expérience dans le domaine d'hydrogéologie.

7.1.6.1 Mobilisation des matériels et des outils

Les engins et matériels utilisés dans les travaux de foration et développement sont lourds : camion de forage, camion compresseur, camion portant les tuyaux, camion d'approvisionnement de matériaux, eau, bentonite, massif filtrant... L'entreprise de forage doit mobiliser tous les efforts pour que les matériels et outils de forage arrivent sur le chantier avec moins de dégâts. Toutefois, parfois des imprévus apparaissent et peuvent retarder les travaux.

Afin de mener à bien les travaux de forage, les matériels suivants sont nécessaires :

Etape	Matériel	Fonction	Illustration
Foration	Foreuse	Creuser le terrain	
	Pompe à boue		
Développement	Compresseur	Appliquer une pression	
Equipement de forage	Tubage provisoire	Equiper le forage	
Transport des matériels et outils	Camion plateau	Transporter les matériels et outils	

Dans la région Atsimo Andrefana, plusieurs obstacles peuvent apparaître lors de la mobilisation des matériels. En effet, il est parfois difficile de traverser la route, parce qu'elle est en grande partie en piste (terre sableuse ou limoneuse), ou à cause d'un pont menaçant de s'écrouler après de fortes précipitations (cas du pont Ambositra lors des travaux de forage à Ankilliloaka). La majorité des communes de la région Atsimo Andrefana sont isolées et se trouvent à une distance lointaine de la ville la plus proche. En conséquence, il est souvent difficile de trouver des solutions de dépannage en cas d'absence d'un bien bloquant la poursuite des travaux de chantier.

7.1.6.2 La foration

Après la mobilisation des besoins nécessaires du chantier et la préparation de l'atelier de forage (Véhicules d'accompagnement, matériels et équipements), le personnel chargé des travaux de forage débute la première étape de réalisation d'un forage qu'est la foration. Elle consiste à creuser le terrain exactement au niveau du point d'implantation du forage défini lors de l'étude géophysique.

Les méthodes de foration ont été prédéfinies dans le contrat du prestataire. Elles ont été choisies en fonction de la nature du sol présent dans le terrain, de la profondeur estimée du forage et de son diamètre.

Il existe différents types de techniques de foration : Le rotary, le havage, le battage, la tarière, le marteau fond de trou.

Le rotary avec circulation de fluide, qui consiste à creuser le sol avec une foreuse munie en général d'un tricône (outil composée de 3 roulettes à dents). La remontée des débris est assurée par une pompe à piston (Duplex ou Triplex) qui injecte à travers les tiges de forage et l'outil au fond des fluides tels que la « bentonite », des polymères ou des boues biodégradables. Elles doivent avoir des propriétés rhéologiques (permettant de porter des éléments fins et grossiers) et isolantes (elles doivent former un film qu'on appelle « le cake » qui étanche les parois du forage pour les stabiliser). Cette technique est utilisée dans le cas de terrains qui ne tiennent pas : argile, sable, graviers, etc.

Le havage : consistant à creuser le terrain à la base du tubage en position verticale, le tubage s'enfonce par conséquent sous l'effet de son poids. Cette technique est adaptée plutôt aux ouvrages peu profonds.

Le battage : consiste à briser la roche en laissant régulièrement tomber un outil. Cette technique est utilisée en formations dures calcaires et dolomies.

La tarière : il s'agit d'une vis sans fin permettant de forer en gros diamètre à faible profondeur. Utilisée en forage de reconnaissance dans les limons, argiles, marnes ou craie, jusqu'à 25 mètres de profondeur environ avec des diamètres compris entre 150 mm et 60 mm.

Le marteau fond de trou : consistant à creuser le sol avec la foreuse et un outil spécifique en faisant remonter les débris avec une circulation d'air « soufflage » grâce à un compresseur. Cette technique est plutôt adaptée pour les terrains durs et fissurés. Son avancement peut être rapide : 10 mètres en un ou deux jours.

Ci-dessous sont présentées les principales caractéristiques des méthodes Rotary et Marteau fond de trou, les deux techniques les plus utilisés dans la région Atsimo Andrefana :

	Forage Rotary	Forage Marteau fond de trou
Terrain de prédilection	Terrain sédimentaire tendre à moyennement <ul style="list-style-type: none"> • Grès • Calcaire • Sable • Roche altérée • Zone alluvionnaire 	Tout type de terrain même dur de bonne tenue tel que : <ul style="list-style-type: none"> • Roche cristalline • Grès bien cimenté • Sable bien consolidé • Roche saine et fissurée • Calcaire
Avantages	Ne consomme pas beaucoup de carburant Maîtrise de la stabilité des parois du puits Evite les éboulements Idéal pour les aquifères alluvionnaires puissants	Rapidité de foration Localisation des arrivées d'eau Possibilité de forer des formations très dures Idéal pour les aquifères de fracturations

Inconvénients	Besoin d'eau pour trouver de l'eau Pas de lecture immédiate des arrivées d'eau Colmatage des aquifères à faible débit Limite pour forer des formations dures	Consomme beaucoup de carburant Déstabilise les formations tendres Atelier très bruyant « Cave » énormément dans les puissants aquifères
A prévoir	Une unité de diagrapie pour localiser les venues d'eau	Une série de tubage métallique pour coffrer provisoirement les parois du puits

A titre informatif, il existe trois grandes familles de roches :

Roches	Exemples	Nature des aquifères rencontrés
Magmatiques	Basalte, Dolérite, Granite	Alimentés par des fractures, des diaclases, des arènes d'altération
Métamorphiques	Schistes, Gneiss, Marbre	Dans des zones d'altération et des interfaces de contact
Sédimentaires	Grés, Calcaire, Conglomérats, Sable non-consolidés	Alluvionnaires souvent, des karsts et des horizons fracturés à la cimentation lavée

Au cours de la foration, il convient de procéder à des essais de pompages sommaires et à l'enregistrement des différents niveaux hydrostatiques au fur et à mesure de l'interception des aquifères afin de localiser et identifier les nappes rencontrées.

A cet effet, chaque mètre, le foreur prend des cuttings (extraits du sol foré) pour observer la lithologie et mesure la vitesse de foration. A chaque venue d'eau, il en mesure le débit et la conductivité. En cas de venue d'eau trop minéralisée d'une conductivité supérieure à 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (norme acceptée de conductivité électrique à Madagascar), le forage est abandonné.

Lorsque le forage est positif en termes de conductivité et de débit, il convient de commencer à l'équiper en mettant en place le tubage plein, crépines et le décanteur. En cas d'éboulement constaté au fond du trou de forage, le tubage est ressorti pour pouvoir forer un peu plus profond.

Après avoir mis en place le tubage, le massif filtrant est versé en vérifiant soigneusement à l'aide d'une sonde à plomb qu'il s'écoule bien dans l'espace inter-annulaire. Ensuite, le joint d'étanchéité est mis en place pour finir par verser la cimentation en tête de 6m si le niveau d'eau le permet.

Si le niveau d'eau est à moins de 6 m de profondeur, la cimentation est réalisée à hauteur du niveau d'eau pour que le ciment puisse bien prendre. Le forage se termine par un soufflage de nettoyage de 20 minutes avec le compresseur 20 bars en redescendant les tiges de forage à un mètre du fond du trou. Le débit d'air envoyé dans le forage est réglé de manière à obtenir un débit maximum sans à-coups.

A l'issue de cette étape, le contrôleur de forage, désigné par le maitre d'ouvrage, signe avec le chef de chantier de l'entreprise un attachement du quantitatif des travaux réalisés, selon le bordereau des prix du contrat :

- profondeur forée en rotary,
- profondeur forée en MFT,
- longueur de tubage,
- longueur des crépines,
- métrage linéaire de gravier.

A Ankililoaka, le sous sol est sédimentaire, avec des bassins alluvionnaires et des marnes calcaires karstifiés. L'entreprise de forage « Lanoe Forage », pour constituer sa meilleure offre et choisir les techniques de foration optimales, s'est basée sur :

- les exigences dimensionnelles posées
- la logistique (Transport de l'atelier, proximité des points d'eau, proximité des stations de service carburant),
- le terrain à forer (sa nature et la profondeur souhaitée),
- l'aquifère ciblé (boue pour l'alluvionnaire et air pour la fracturation).

Des coefficients de difficultés sont ensuite attribués à chaque volet permettant ainsi de déduire le choix final de la méthode à mettre en œuvre.

Pour le cas d'Ankililoaka, il a été prévu de procéder d'abord à la foration au rotary puis avec marteau fond de trou après l'atteinte de la couche calcaire. Un tubage provisoire a été mis en place à chaque traversée d'aquifère pour tester sa productivité, tout en masquant les autres aquifères.

Au cours de la foration, le forage s'est montré très productif grâce à la présence de deux aquifères : l'un de 30 à 38 m de profondeur et l'autre de 49 à 54 m environ.

Deux tubages provisoires ont été mis en place. L'un en acier de diamètre 220 mm a été descendu à 18,5 m de profondeur, et le deuxième de diamètre 160 à 180 mm télescopé jusqu'à 54 m de profondeur pour maintenir les terrains en place. Le terrain creusé à Ankililoaka est caractérisé par une hétérogénéité du type des couches ainsi par la présence d'une nappe artésienne (nappe en charge, autrement dit la pression présente est plus élevée que le niveau du sol).



Figure 20 : Inondation suite à un fort débit et coincement des tiges par éboulement



Figure 21 : Difficulté rencontrée de la descente des tubages en acier

A Ankililoaka, le planning préparé par l'entreprise de la foration avait prévu 15 jours. En réalité, les travaux ont pris 4 semaines, avec 2 pannes totalisant six jours d'arrêt et une semaine perdue à tenter de réaléser en vain le forage à la boue (méthode prévue initialement pour équiper le forage en PVC 6 pouces). Il est à mentionner qu'un premier forage avait été réalisé à proximité de l'implantation du réservoir. Lors des travaux de réalisation, l'équipement de forage a été vrillé, car les ouvriers ont tenté de pousser l'équipement de forage mis en place vers le bas, ce qui causé un éboulement au fond ne permettant pas ainsi de mettre en place la pompe comme prévu.



Figure 22 : Premier forage



Figure 23 : deuxième forage

7.1.6.3 Développement d'un forage

Cette étape a pour but de nettoyer la zone de captage d'eau dans un forage et d'éliminer la sédimentation présente. Ceci permet par conséquent d'améliorer la productivité du forage et d'optimiser la capacité de filtration du massif filtrant mis en place qui se compacte davantage pour réduire les vides et éviter l'infiltration des particules fines. Pour développer un forage, on peut faire appel à ces deux techniques :

➤ Développement à l'air lift

Cette méthode repose sur l'injection d'air comprimé dans une colonne qu'on met en place dans le forage. L'air injecté entraîne avec lui l'eau et permet ainsi de nettoyer les parois de l'équipement et d'améliorer ainsi la productivité de l'aquifère exploité. Pour développer l'ensemble du forage, il est nécessaire de changer la position de la colonne et la mettre à différentes profondeurs du forage.

Pour éviter la détérioration de l'équipement PVC dans le forage, il convient d'appliquer un débit d'air faible et de l'augmenter progressivement. Un contrôle de la turbidité de l'eau captée à l'issue du développement doit être fait pour connaître sa teneur en sable.

La méthode de contrôle de la présence de sable, dite de la « tâche de sable » est une méthode très pratique et facile à mettre en oeuvre. Si la tâche de sable au fond d'un seau de 10 litres centrifugé et décanté fait moins d'un centimètre de diamètre, on peut déduire que la teneur en sable est satisfaisante.

➤ Développement par pompage

Cette méthode repose sur le fonctionnement d'une pompe que l'entreprise met dans le forage provisoirement pour pomper l'eau des aquifères captées et les développer davantage.

La durée de développement de certains forages peut prendre quelques heures tandis que pour d'autres, le développement nécessite plusieurs jours. En effet, ceci dépend en particulier de la pertinence de la méthode utilisée ainsi des particularités physiques du forage.

Il faut rappeler qu'un mauvais développement peut diminuer la durée de vie d'un forage en augmentant le risque d'envasement ainsi les essais de pompage seront faussés et les résultats mal interprétés.

Le développement du forage d'Ankililoaka s'est fait en deux reprises à cause des particularités que présentait la nappe captée et de l'adoption d'une autre méthode que ce qui été décrit dans le contrat entre le prestataire et le MO. Il est à mentionner que le forage d'Ankililoaka exploite deux nappes (entre 33 m et 38 m et entre 46 m et 53,25 m).

Il a été décidé de procéder à un air lift dans la chambre de pompage (où sera installée la pompe), puis au toit des crépines inférieures et au milieu des crépines inférieures. En vue d'éliminer toutes interférences entre les deux horizons producteurs, les mêmes opérations ont été réalisées sur l'aquifère supérieure. Le schéma ci-après représente le protocole de l'air lift utilisé à Ankililoaka.

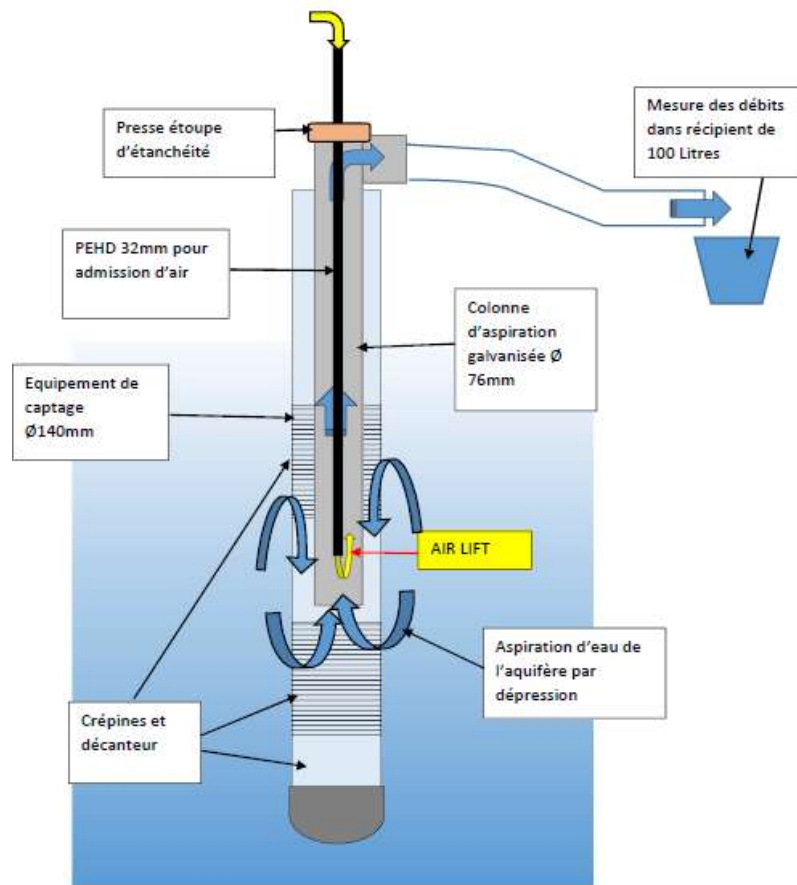


Figure 24 : Schéma explicatif de la méthode d'air lift utilisée à Ankililoaka

Avec des valeurs de turbidité égales à 10, 6 et 5 NTU, la DREAH AA n'a pas validé les résultats. L'entreprise de forage se trouvait alors dans l'obligation de continuer le développement du forage pour retrouver des résultats satisfaisants (turbidité < 5 NTU). Puisqu'au cours des travaux de développement à l'air lift, il a été constaté un risque de détérioration de l'équipement au fur et à mesure des manœuvres réalisées. L'entreprise de forage a alors décidé de procéder à un développement par pompage alterné sur des zones bien définies.

Le pompage alterné : consiste à mettre le forage en production par pompage en provoquant des arrêts brusques de la pompe à plusieurs reprises. Ceci crée des variations brutales de pression permettant ainsi de supprimer la formation des ponts de sable présents qui peuvent entraîner une baisse conséquente de la conductivité hydraulique et peuvent endommager les crépines.

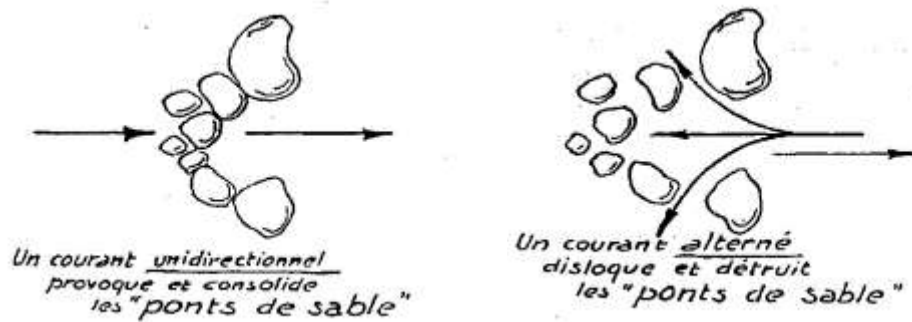


Figure 25 : Méthode d'Air lift⁴

Dans le cas du forage d'Ankililoaka, le pompage alterné a reposé sur 1000 à coups et 3 jours de pompage qui ont permis d'avoir des résultats validés par la DREAH AA. Une vérification du fond du décanteur après 72h de la fin du développement, aucun dépôt notable n'a été enregistré.

A Tanandava Station, lors du développement à l'air lift, le tuyau PEHD utilisé est sorti du tubage à maintes reprises à cause de la forte pression appliquée et de l'absence d'une protection en tête du tube PEHD.



Figure 26 : Déclenchement du tuyau PEHD de la colonne

7.1.6.4 Essais de pompage

A l'issue du développement de forage, on dispose d'une estimation du débit que permet de fournir les aquifères captés. Ainsi pour s'assurer de leur productivité dans le temps et de leur satisfaction des besoins de la population, il convient de procéder à des essais de pompage.

Avant d'entamer cette étape, il est nécessaire de vérifier la valeur du niveau statique, c'est à dire le niveau de l'eau en absence de pompage. Pour cela, il est recommandé de laisser le forage au repos pendant au moins 24h après son développement et de mesurer la profondeur de l'eau avec une sonde.

Il est aussi conseillé de vérifier si, dans la zone du forage, il existe un ouvrage exploitant les eaux souterraines en fonction. En effet, les interprétations des résultats des essais risquent d'être erronées s'ils ne prennent pas en compte l'exploitation de la nappe de cet ouvrage.

Les essais de pompage se font grâce à l'installation de pompe électrique immergée, d'une motopompe ou une pompe manuelle. La pompe à mettre en place pour les essais de pompage est choisie de manière à pomper le débit maximal capté lors du développement de forage à la profondeur de captage.

En général, deux types d'essais sont réalisés :

⁴ Selon la version MABILLOT

○ Essai par paliers

Il renseigne sur la performance du forage en mesurant le rapport rendement-rabattement. On rappelle que le rabattement est la diminution du niveau d'eau dans une nappe après son exploitation.

La méthode standard des essais par paliers est celle reposant sur des pompages non enchainés, c'est-à-dire avec des temps de paliers identiques espacés d'un temps de repos identique pour s'assurer de la stabilité du niveau dynamique.

Pour les débits supérieurs à 2 m³/h, il convient de pomper le débit maximal et de le diviser par 3 ou 4 pour connaître le débit de chaque palier. Il est conseillé d'attendre que le rabattement soit quasi-stabilisé à la fin de chaque palier et de prolonger la durée de pompage si le niveau de l'eau continue de descendre de façon significative.

Pour éviter l'infiltration des eaux pompées lors de cet essai dans la réserve de la nappe, il faut veiller à respecter une distance minimale de 50 à 100 m entre le forage et le point de rejet des eaux pompées. Le personnel chargé de la réalisation de cet essai enregistre au fur et à mesure les niveaux d'eau mesurés dans le forage correspondant à chaque palier.

A l'issue de cet essai, l'entreprise de forage produit une courbe représentant l'évolution du débit et des niveaux d'eau en fonction du temps. Des mesures de turbidité, de conductivité et de pH pourront également être fait in situ pour suivre leur évolution dans le temps en fonction du débit pompé.

A Saint Augustin, l'entreprise de forage (Bushproof) a effectué trois pompages à débits croissants de 2 heures chacun (augmentation d'environ 3,6 m³/h d'un palier à un autre) espacés d'un arrêt d'une heure de manière à retrouver approximativement le niveau d'eau initial du forage. Le graphe ci-après présente les résultats de cet essai. Trois pompages à débits croissants de 2 heures chacun ont été effectués.

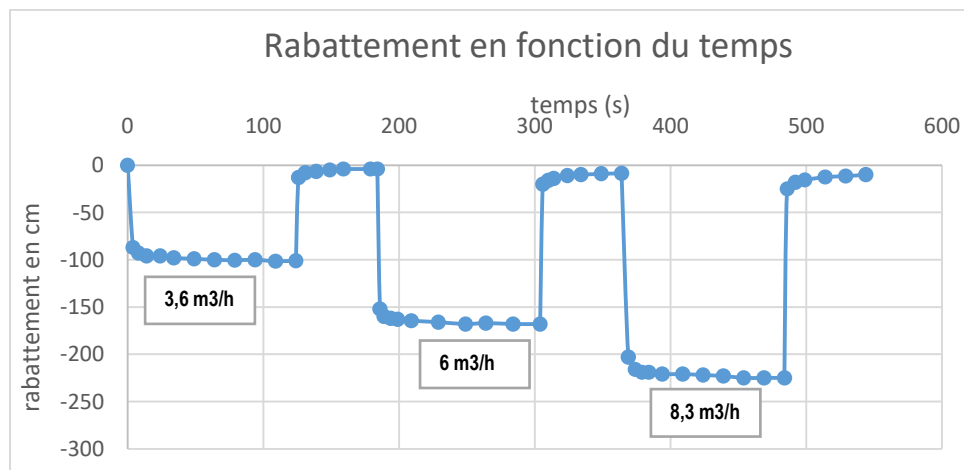
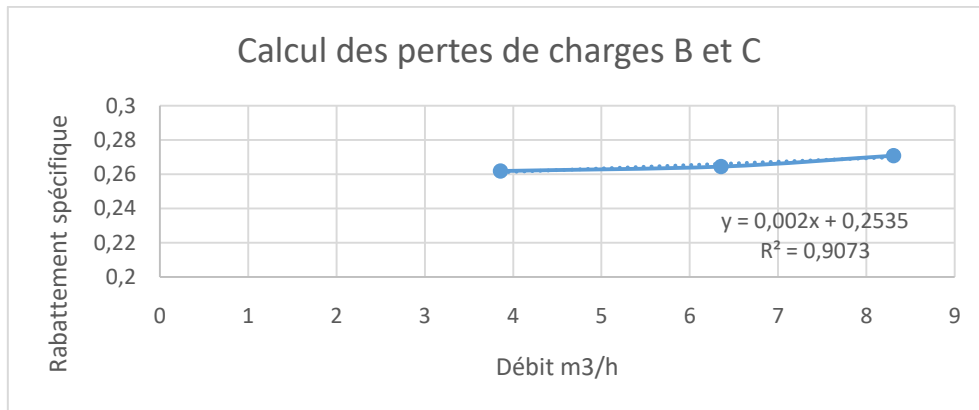


Figure 27 : Résultats des essais par paliers à Saint-Augustin

L'équation de JACOB est une formule qui permet de calculer le rabattement du niveau d'eau 's' dans la nappe en fonction du débit de pompage (Q) et des coefficients de pertes de charges (A, B). En effet, ces pertes de charge sont provoquées par les turbulences produites dans l'aquifère à proximité du forage et par le transfert de l'eau vers la pompe en passant par le massif filtrant et les crépines.

$$s = A * Q + B * Q^2$$

La représentation graphique du rabattement spécifique (s/Q) permet de déduire les valeurs de A et B.



Dans ce cas, A est égal à 0,2535 et B est égal à 0,002.

Si la valeur de B est inférieure à $1,9 \cdot 10^{-2}$, on peut conclure que le forage a été bien développé. Ainsi l'évolution du rabattement en fonction débit peut être déduite pour chaque valeur de débit d'exploitation. En fixant le rabattement admissible à ne pas dépasser par rapport à la position des crépines, on peut calculer le débit d'exploitation maximal.

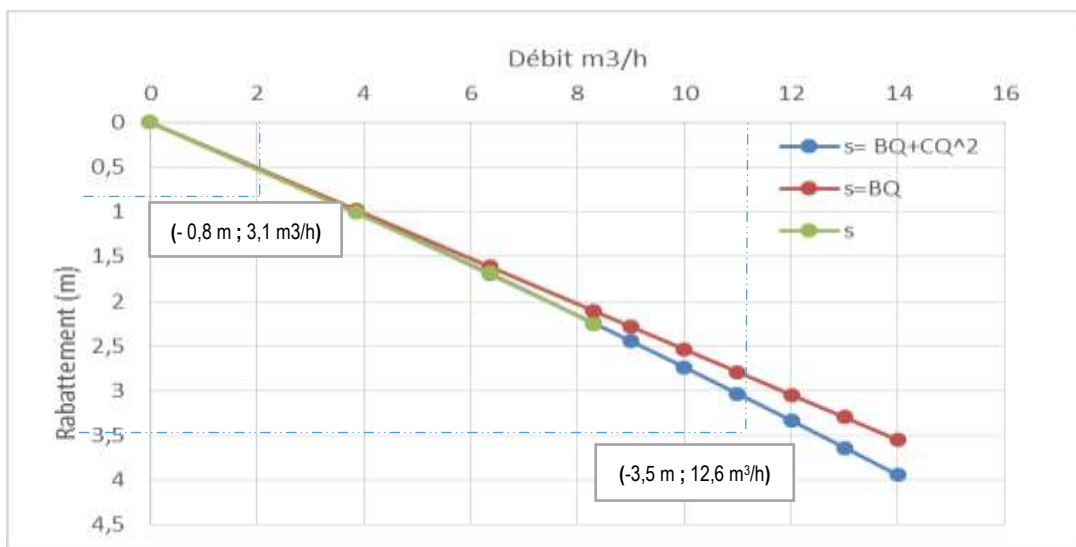


Figure 28 : Résultats des essais de pompage du forage de Saint Augustin

Pour le cas de Saint-Augustin dont les résultats des essais de pompages par paliers sont donnés ci-dessus, le rabattement maximal est estimé à -3,5 m et le débit correspondant est de l'ordre de 12,6 m3/h. Cependant étant donné la particularité de la zone de pompage, il a été préférable de limiter le rabattement au toit de la formation sableuse c'est-à-dire à 0,8 m afin de laisser la nappe sous pression. Le débit maximal est estimé alors à 3,1 m3/h. Par ailleurs, le débit actuel est de 7.8 m3/h.

○ Essai longue durée

Il permet de connaître l'impact du pompage de l'eau au débit d'exploitation prévu sur les aquifères captés, en estimant les paramètres hydrodynamiques de ces aquifères, en particulier la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.

Il est à rappeler que :

- La *transmissivité* est égale au débit que peut fournir un aquifère sur toute son épaisseur et sur un mètre de largeur. Elle est exprimée en m^2/s .
- Le *coefficient d'emmagasinement*, il s'agit d'un paramètre adimensionnel qui permet de quantifier la fraction d'eau souterraine stockée dans la zone saturée et disponible à l'exploitation par pompage.

La durée de pompage de l'essai longue durée est égale en général à 24h (ou 48h si on a des doutes de non stabilisation du rabattement).

Le forage de Tanandava Station est de profondeur 44 m et exploite une nappe située entre 13 m et 23m. Pour les essais de pompage longue-durée de ce forage, l'entreprise de forage (Lanoe Forage) a réalisé un pompage de 13 m³/h pendant 48h (2880 min) sans arrêt. Les résultats obtenus sont représentés sur le graphe ci-dessous.

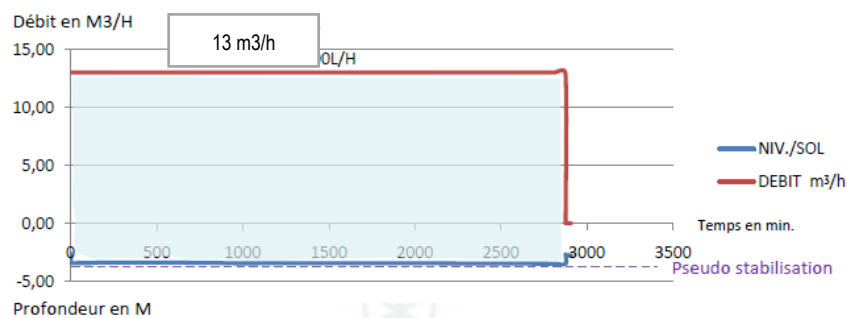
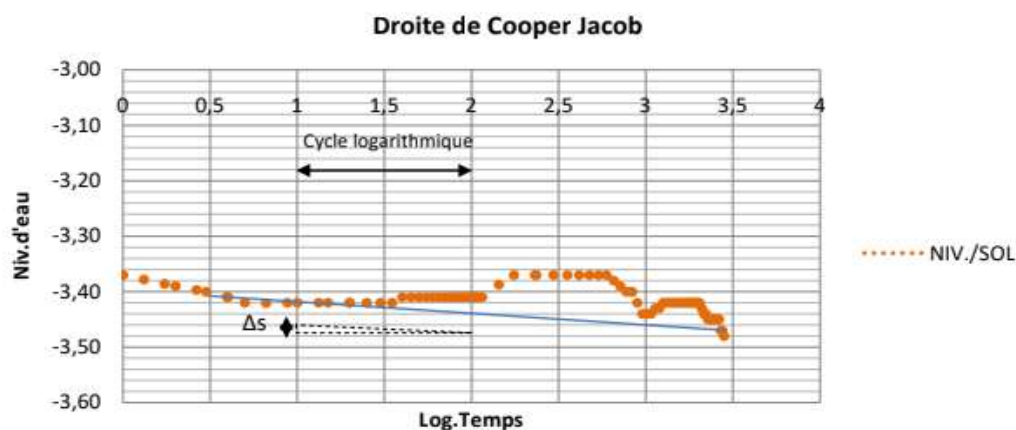


Figure 29 : Essais longue durée Tanandava station

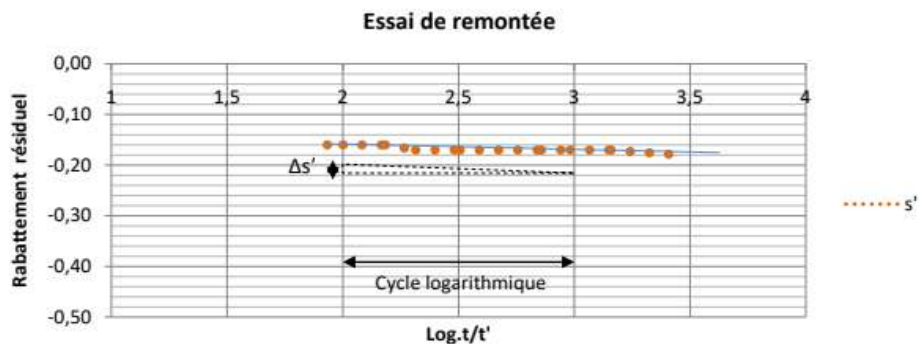
La courbe de l'évolution du rabattement permet de conclure qu'on obtient une pseudo-stabilisation du niveau d'eau (rabattement de 0,84 m) en pompant à 13 m³/h pendant une longue durée (48h). En utilisant la formule de JACOB ($T = 0,183 Q / \Delta s$) et la représentation graphique du niveau d'eau en fonction du log(temps) on déduit la valeur de la transmissivité.



Puisque Δs est égale à 0,02 dans ce cas, la transmissivité a été estimée à 2854,80 m³/j/m.

Lors de l'essai de pompage longue-durée, on procède à un essai de remontée. Ce dernier permet d'avoir une valeur plus réaliste de la transmissivité (car les rabattements mesurés en cours de pompage sont souvent perturbés par les variations de débit fréquentes et par les pertes de charges). De plus, grâce à cet essai, on peut déterminer le rayon d'influence du forage lors de son exploitation continue.

L'essai de remontée à Tanandava Station a permis d'estimer le Δs à 0,02 ce qui mènera à la même valeur de transmissivité trouvée préalablement.



t' étant le temps écoulé depuis le début de la phase de remontée, et le s' le rabattement mesurés pendant la phase de remontée.

La conductivité électrique est calculée à partir de la formule $K = \frac{T}{H}$ avec T la transmissivité et H l'épaisseur verticale de l'aquifère.

A Tanandava Station, K est égale à $3,304 \cdot 10^{-3}$ m/s ce qui correspond à une zone perméable.



Figure 30 : Nettoyage du fond de forage avant



Figure 31 : essais de pompage

7.1.6.4.1 Echantillonnage et analyse de l'eau après réalisation du forage

Après finalisation des essais de pompage, l'entreprise de forage doit prélever un échantillon d'eau et le déposer dans un laboratoire spécialisé pour faire les analyses physico-chimiques et microbiologiques. La validation définitive d'un forage ne pourra se faire sans l'établissement des analyses d'eau prélevée du captage. L'idéal serait d'avoir une conformité des résultats des analyses d'eau prélevée au niveau du captage aux normes de potabilité mises en vigueur. Toutefois, on peut parfois valider un forage dont

l'eau ne respecte ces normes si on juge que cette anomalie est justifiée par les conditions du prélèvement ou par une erreur de la part du laboratoire prestataire.

A Madagascar, il est exigé de faire les analyses microbiologiques dans un laboratoire agréé (par exemple Institut Pasteur à Antananarivo). L'institut Pasteur met à disposition des entreprises de forage des recommandations à suivre avant le dépôt de l'échantillon d'eau. Un formulaire de demande d'analyse est téléchargeable en ligne sur la plateforme du laboratoire.

Le laboratoire exige d'effectuer le prélèvement avec des mains propres ou des gants stériles et d'utiliser des flacons stériles (de volume 500 ml) contenant de thiosulfate de sodium (au moins 20 mg/l) pour les eaux chlorées. Lors du prélèvement, le personnel sur chantier est prié de ne pas toucher avec les doigts le col et l'intérieur du bouchon, de bien remplir le flacon sans faire déborder et de le mettre immédiatement en glacière équipée de plaques eutectiques.

Pour une éventuelle mesure de température ou autre paramètre sur site, il est obligatoire d'utiliser un autre échantillon que celui dans le flacon. Afin de transporter l'échantillon, l'institut Pasteur préconise de le maintenir dans une enceinte réfrigérée entre 1°C et 10 °C jusqu'à la livraison au laboratoire et éviter son exposition aux rayons de soleil et sa congélation. Le délai d'acheminement de l'échantillon doit être compris entre 18 et 24 h.

Pour le cas de Tanandava et Ankililoaka, le dépôt de l'échantillon auprès de l'institut Pasteur a connu des problèmes de logistique. En effet, étant donné que la commune de Tanandava se trouve à plus de 1127 km d'Antananarivo, le seul moyen de transport envisagé qui respecte les conditions du délai de dépôt est l'avion. Au plus deux vols sont programmés par jour depuis Tuléar (la ville la plus proche disposant d'un aéroport desservant à Antananarivo).

Sachant que pour arriver à Tuléar depuis Tanandava station, il faut au moins 7h, l'acheminement de l'échantillon vers l'aéroport a été décalé par rapport à la journée de finalisation du développement. Un échantillon a été prélevé une deuxième fois, mais à cause d'un léger retard, il n'a pas été accepté pour l'enregistrement du vol prévu. Finalement, une troisième tentative a été faite et a permis de déposer l'échantillon dans les règles de l'art.

Les résultats d'analyse d'eau des forages de Tanandava Station et d'Ankililoaka ont montré des anomalies malgré le respect des conditions de prélèvement et d'acheminement de l'échantillon.

7.1.7 Forages spéciaux

i. *Le cas de forage en bord de mer (Biseau salé)*

Dans le cas où le forage est implanté à proximité de la mer, il y a risque d'intrusion d'une salinisation excessive des eaux captées pouvant les rendre inadaptées à la consommation humaine. Pour éviter ce problème, il convient de procéder à des études justifiant l'absence d'effet de la mer sur la qualité de l'eau à exploiter.

Cas de Saint Augustin : Choix du type de captage et influence d'effet de marée sur la conductivité de l'eau pompée. Saint Augustin est une commune caractérisée par la présence de plusieurs résurgences. Les habitants ainsi les autorités locales ont exprimé leur souhait d'utiliser la résurgence d'Andoharano située à 3,5 km pour le captage. Cette solution n'a pas été retenue pour les raisons suivantes :

- Conductivité électrique très élevée à cause du mélange de l'eau de la résurgence avec l'eau de rivière (qui se jette à la mer),
- La rivière d'Andoharano assure l'irrigation des nombreuses rizières et constitue une source d'activité pour les pêcheurs,
- Un projet d'écotourisme est prévu d'être développé à Saint Augustin via la piscine naturelle et la résurgence d'Andoharano,
- Incertitude de la base de données de débit horaire maximum que peut fournir la résurgence.

Finalement, il a été construit un forage à 2000 m de la mer faisant une profondeur de 8 m. Il capte la nappe dans les sables quaternaires littoraux.

Pour étudier l'influence de l'effet de marée sur la conductivité de l'eau pompée dans le forage, une étude a été faite et a permis de suivre la conductivité de l'eau pompée sur une période incluant des faibles, moyens et forts coefficients de marée.

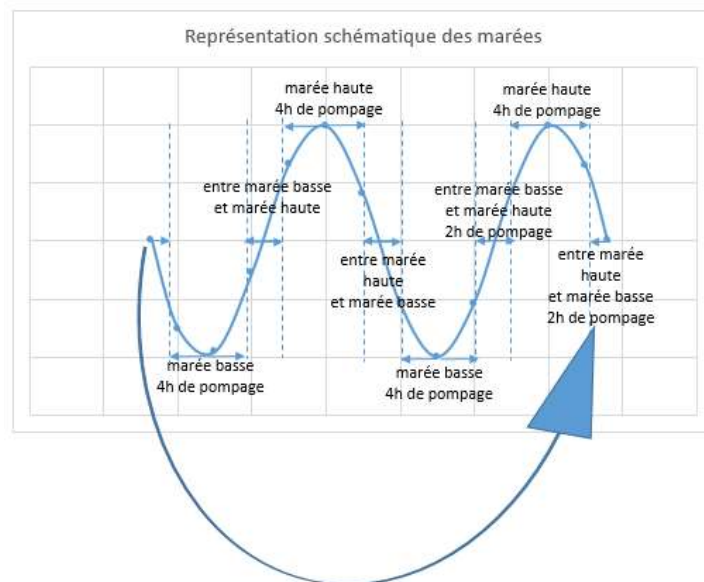


Figure 32 : Représentation schématique des marées à Saint Augustin

A l'issue de cette étude, il a été conclu qu'au débit 4 m³/h la marée n'influait pas la conductivité même à marée haute. Ainsi, il a été décidé d'effectuer le pompage sur toute la période d'ensoleillement à un débit de 5m³/h.

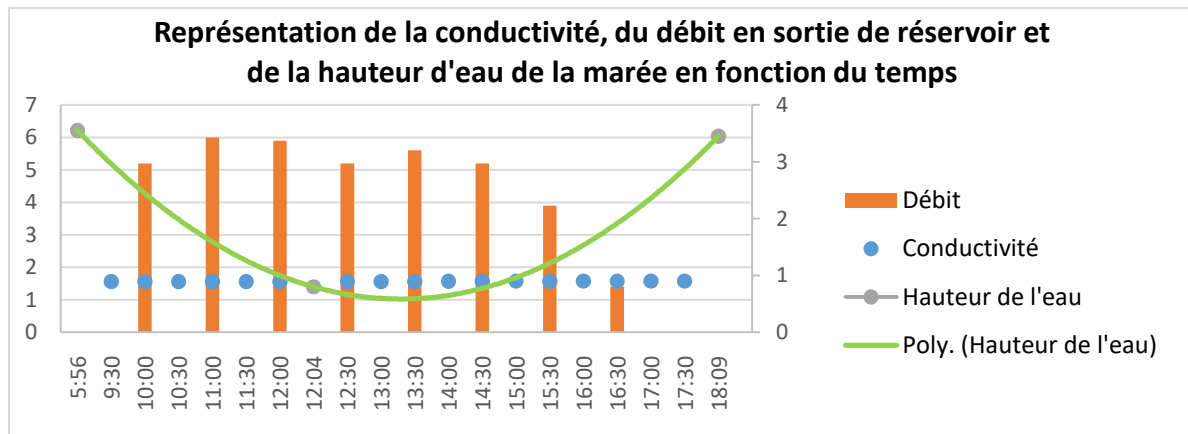


Figure 33 : Conductivité en fonction de la marée

7.1.7.1 Le choix du forage en cas de risque de pollution agricole

En présence de risque de pollution causée par des activités agricoles ou industrielles, la construction d'un forage constitue la meilleure solution

Cas d'Ambohimahavelona : Recours au forage même en présence d'importantes sources : Dans la commune d'Ambohimahavelona, quatre résurgences de la nappe karstique du plateau calcaire ont été recensées dont deux se situaient en aval d'une zone agricole et deux en amont. Malgré le débit assez bon de ces résurgences, il a été décidé d'avoir recours à un forage pour éviter d'éventuelles contaminations des sources à cause de l'utilisation des produits phytosanitaires très toxiques utilisé par les agriculteurs dans la zone des sources.



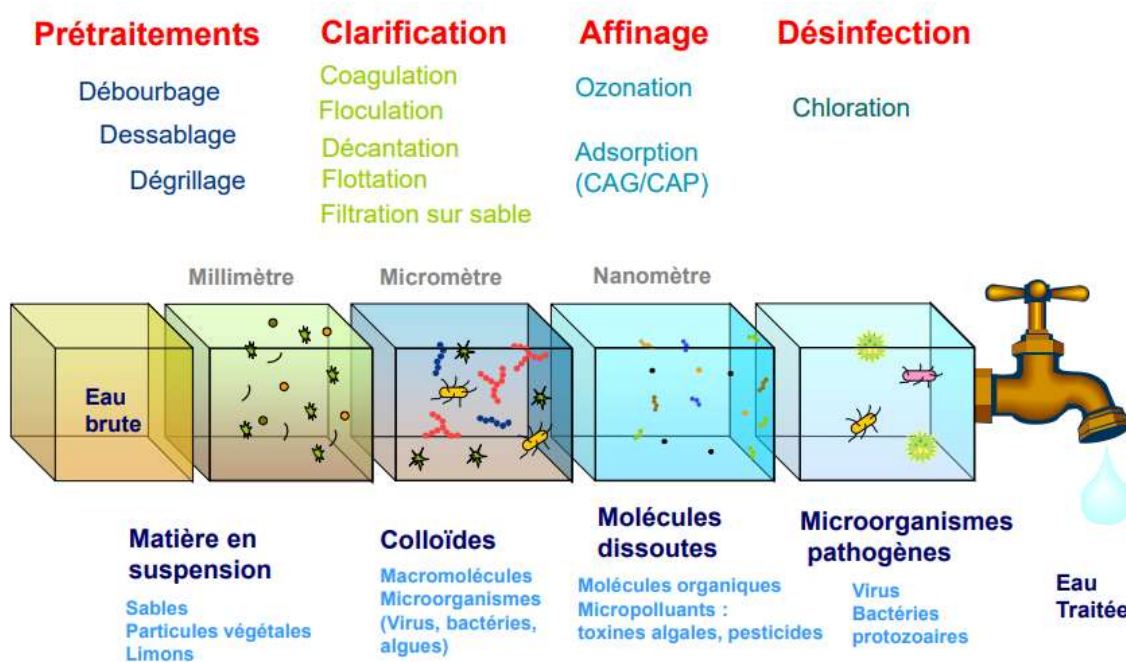
Figure 34 : Forage du chef-lieu d'Ambohimahavelona

8 Systèmes de traitement

Puisque l'eau pompée est destinée à la consommation humaine, il est impératif qu'elle soit potable, c'est-à-dire qu'elle satisfasse les normes de potabilisation d'eau en vigueur dans le pays en question.

Selon les anomalies que présente l'eau captée, le choix du procédé de traitement à mettre en œuvre est décidé. En effet, les analyses d'eau brute effectuées à l'issue de la phase de réalisation du captage / forage permettent de connaître les paramètres de l'eau à corriger pour avoir une eau potable. Les principaux paramètres présentant d'un risque de maladies sont : la turbidité (la teneur des particules suspendues dans une eau), la pollution fécale et le taux de fer et de manganèse présents dans l'eau captée. Cependant, le choix du système de traitement à mettre en place doit tenir en compte les contraintes financières et techniques auxquelles fait face le projet concerné. En effet, l'installation d'un système de traitement requiert la présence de matériel, de compétences techniques, de surveillance et d'entretien régulier.

En général, un traitement d'eau destiné à la consommation humaine suit les étapes suivantes en fonction de la présence ou pas du paramètre à traiter. Le schéma ci-dessous résume les étapes de ce traitement.



La vérification du taux de turbidité présente dans l'eau permet d'avoir une première idée sur le procédé à mettre en place.

Taux de turbidité	Système de traitement
NTU < 5	Chloration ou filtration directe
5 < NTU < 30	Filtration, décantation puis chloration
NTU > 50	Floculation, décantation, filtration puis désinfection

Généralement, les types de traitement d'eau destinée à la consommation humaine dépendent du type de ressources en eau captée. Le tableau ci-après regroupe les principaux traitements à apporter en fonction de l'eau exploitée.

Eau de forage	Chloration
Eau de source, eau de puits	Décantation, filtration, chloration
Eau de surface statique (lac, étang,...)	Floculation, décantation, filtration, chloration
Eau de surface dynamique (rivière, torrents)	Prétraitement, floculation

8.1 Descriptif des étapes de traitement

8.1.1 Prétraitement

Il a pour but d'éliminer les grosses particules présentes dans l'eau brute. Il peut être assuré par des débris végétaux, des bois flottants ou du sable. En cas de nécessité, on peut installer une grille (appelée autrement dégrilleur) installée, en général, en amont des ouvrages de traitement et qui consiste à retenir les éléments solides les plus importants, plastiques, morceaux de bois. Selon la taille des éléments solides contenus dans l'eau, il existe trois types de dégrillages.

Type de dégrillage	Espacement des barreaux
Dégrillage fin	< 10 mm
Dégrillage moyen	10-30 mm
Dégrillage grossier	30- 100 mm



Un déssableur ou/et un déshuileur peuvent être aussi mis en place pour piéger les particules solides de granulométrie comprise entre 200 et 500 μm (par exemple les sables et graviers). Ces deux dispositifs permettent aussi de protéger les ouvrages de traitement situés en aval.

8.1.2 Stockage- Décantation

Ce procédé permet d'éliminer les MES⁵ décantables et une partie des organismes pathogènes. Il est à mentionner que les pathogènes ont une durée de vie limitée s'ils se trouvent dans un milieu poreux, comme l'eau. En effet, selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), 99% des bactéries indicatrices

⁵ MES (Matières en suspension) : désigne l'ensemble des particules minérales ou/et organiques insolubles visibles présentes dans une eau.

de pollution fécale s'éliminent après 3 à 4 semaines de stockage⁶. C'est pour cela qu'il est conseillé de stocker l'eau brute contenant des MES et des pathogènes. Néanmoins, il faut bien estimer le temps de séjour pour éviter le développement d'autres pathogènes au fond du réservoir de stockage.

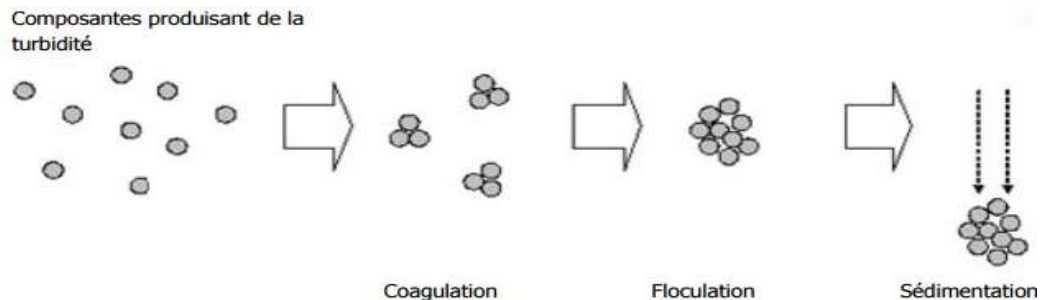
Par la suite, il convient de vérifier la turbidité de l'eau en sortie (elle doit être au moins inférieure à 5 NTU) pour savoir si un autre traitement doit être effectué. Un test de décantation dans une bouteille peut être fait. Si après une heure, la majorité des MES n'est pas décantée au fond de la bouteille, il faut procéder à une clarification par floculation

8.1.3 Clarification

i. Coagulation- Floculation- Sédimentation

Ce procédé est recommandé dans le cas de captage des eaux de surface et des eaux souterraines karstiques parce qu'il permet d'éliminer la grande teneur en MES qu'elles présentent. De plus, il permet d'éliminer les colloïdes maintenus en suspension par des phénomènes électrostatiques et d'hydratation et réduit ainsi le nombre de pathogènes.

Ce procédé nécessite l'introduction d'un coagulant qui neutralise les colloïdes (particules en suspension ayant une taille inférieure au micromètre et supérieure à quelques nanomètres et ne s'agglomérant pas naturellement) et d'un floculant (un polymère permettant d'avoir des agrégats qu'on appelle « floc »). Ensuite, l'eau est introduite dans un décanteur où les floccs se déposant au fond et l'eau récupérée est celle en surface.



Les coagulants les plus utilisés sont :

- **Sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$** : en respectant la condition $6 < \text{pH} < 7,5$ pour une bonne floculation,
- **Sulfate de fer $Fe_2(SO_4)_3$** : avec $5 < \text{pH} < 9$.

Il existe aussi des coagulants liquides mais leur utilisation n'est pas recommandée du fait de la complexité de leur transport. Dans le cas où le pH de l'eau ne respecte pas les valeurs souhaitées, il peut être corrigé par l'ajout d'un réactif (par exemple la chaux⁷).

⁶ Selon « Eau-Assainissement –Hygiène pour les populations à risques », Action contre la faim.

⁷ Chaux : réactif pouvant se présenter sous deux formes (vive « CaO », ou éteinte « Ca(OH)_2 »)

8.1.3.1 Filtration sur sable

C'est un procédé physique qui fait appel à un lit de matériaux filtrants (par exemple le sable) qui permet de retenir les particules qui persistent et laisse passer l'eau.

8.1.3.2 Désinfection

Cette étape a pour but de détruire les organismes pathogènes en bloquant leur activité enzymatique et évite la contamination de l'eau par d'autres pathogènes lors de son transport ou son stockage. La méthode la plus simple à utiliser est la chloration, qui consiste en l'injection du chlore. Ce dernier est un oxydant qui peut réagir avec les matières oxydables organiques et inorganiques. Pour une chloration efficace, il faut que la teneur en turbidité soit inférieure à 5 NTU et le pH entre 6,5 et 7,5.

La dose de chlore à injecter ainsi le temps de contact entre le désinfectant et l'eau sont deux paramètres essentiels à considérer lors de l'injection du chlore. Le chlore résiduel libre représente le taux de chlore non utilisé par l'eau et qui y reste. Selon la norme de l'OMS, le taux de chlore résiduel, à la sortie de la station de production, devrait être égal à 1 mg/l et au niveau du robinet, il devrait être compris entre 0,5 et 0,6 mg/l. Néanmoins, en cas d'épidémie, sa valeur peut atteindre 1 mg/l. A noter que tous les consommateurs n'apprécient pas de boire une eau chlorée. L'injection de chlore doit se faire alors à une distance suffisamment lointaine des points d'eau.

Selon la norme malgache, la valeur de référence de la conformité de chlore résiduel est entre 0,3 à 2mg/l.

8.1.3.3 Aération

Elle permet l'oxydation de certaines matières dissoutes (par exemple le fer qui peut se trouver en grande quantité dans les eaux souterraines), l'oxygénation de l'eau et le dégazage du CO₂ se trouvant en excès dans l'eau. Pour assurer cette fonction, on peut se contenter d'une injection d'air sous pression dans l'eau, ou faire couler l'eau sur une cascade pour augmenter son exposition à l'air.

Prétraitement (Dégrillage)



Figure 35 : <http://traitementeaux.e-monsite.com/pages/iii-procedes-de-traitement/iii-a-les-principaux-procedes-de-traitement-physique/1-le-pretraitement.html>

Clarification (coagulation)



Figure 36 : <http://www.flers-agglo.fr/cadre-de-vie/eau-et-assainissement/les-missions-du-service-des-eaux/>

Désinfection (Chloration)



Figure 37 : <http://www.sieff.fr/developpement-durable/traitement-de-leau>

A Madagascar, les normes mises en vigueur pour conclure qu'une eau est potable sont les normes publiées par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), il n'y a pas de normes spécifiques au pays. Dans la région Atsimo Andrefana, il est difficile de mettre en place un système de traitement complexe

parce qu'il n'y a pas de compétences techniques suffisantes pour assurer sa mise en service et sa maintenance à long terme. De plus, le coût que nécessite l'installation d'un système de traitement dans la région est très onéreux.

Face à cette problématique, dans le cadre des projets d'AEP réalisés par la DREAH AA en collaboration avec ses partenaires, on cherche une ressource en eau permettant d'avoir une eau qui tend vers une eau potable, soit source ou forage. Comme énoncé dans la partie « Captage », des analyses d'eau sont obligatoirement réalisées à l'issue des travaux de forage. Les résultats de ces analyses font preuve parfois de non-respect des normes de potabilité de l'eau. Un système de traitement pas compliqué peut être mis en place pour corriger les paramètres qui ne respectent pas ces normes.

8.1.3.3.1 Aération à Saint-Augustin

L'eau brute pompée à Saint Augustin présente une odeur anormale due aux taux élevés de l'hydrogène sulfuré (H_2S). Il a été décidé alors de mettre en place un système d'aération sous forme de deux cascades successives au niveau du réservoir d'eau avant la distribution.

L'eau issue de la conduite de refoulement, tombe directement dans une gouttière en PVC d'une longueur de 6 m. Le débordement de l'eau, créé de chaque côté de la gouttière, donne lieu à une cascade, permettant ainsi une première oxygénation de l'eau. Une plaque de plexiglas, située 40 cm en dessous de la gouttière PVC et d'une longueur égale à cette dernière, recueille l'eau de cette première cascade. L'eau s'étend alors sur toute la surface de la plaque avant de retomber dans le réservoir, créant ainsi une seconde cascade.



Figure 38 : Système d'aération

8.1.3.3.2 Chloration à Saint-Augustin

La commune de Saint-Augustin est caractérisée par des périodes de fortes pluies entraînant un risque d'inondation. Ce dernier peut recouvrir la plaine alluviale d'une hauteur d'eau de 1 m et induire une infiltration microbiologique verticale. Dans ce contexte, il a été conclu d'instaurer un système d'injection de chlore.

Dans la région Atsimo Andrefana, il n'est pas facile de s'approvisionner en chlore. En conséquence, il a été décidé de le produire localement grâce à des générateurs de chlore portable de marque WATALYS. En effet, à partir d'un mélange d'eau et de sel alimentaire, il se produit une solution d'hypochlorite de sodium ($NaClO$) qu'on peut injecter dans le réseau en respectant les doses convenues.

Pour le cas de Saint Augustin, l'injection du chlore se fait via un doseur « DOSATRON » qui est un système simple d'emploi permettant le dosage du chlore en fonction du volume pompé sans besoin

d'énergie externe. En effet, cet appareil utilise la pression d'eau y est introduite comme seule force motrice puis aspire la solution de NaClO à la dose souhaitée (toujours proportionnelle au volume d'eau introduit dans le DOSATRON) et la mélange avec l'eau motrice. Ce système est installé dans l'abri gardien et injecte le chlore au niveau de la conduite de refoulement. Pour simplifier l'utilisation de ce système, le maître d'œuvre a mis à disposition du gérant du réseau, une fiche explicative des démarches à suivre pour le faire fonctionner.



Figure 39 : Système de chloration à Saint-Augustin

Du fait que cette réaction est de type exothermique et la solution de ne doit pas dépasser 40 °C. Une séparation des deux appareils WATALYS dans deux seaux différents avec bain marie était nécessaire.

Des analyses d'eau sont effectuées régulièrement au niveau de la conduite de refoulement et des points d'eau (bornes fontaines/kiosques et branchements privés).

8.1.3.3.3 Désinfection à Ambiky (village de la commune d'Ambohimahavelona)

A Ambiky le réseau d'AEP capte l'eau d'une résurgence. Les analyses de l'eau brute montre qu'elle ne satisfait pas les normes.

Paramètre	Valeur	Norme
Bactéries Coliformes	65Npp/100ml	0/100 ml
Escherichia coli	34 Npp/100ml	0/100 ml
Entérocoques intestinaux	137 Npp/100ml	0/100 ml

Un système de traitement a donc été mis en place pour remédier à ce problème. Il repose sur l'injection de chlore directement installé sur la conduite de refoulement. Le chlore est produit à partir de sel alimentaire par un système Watalys. Des dispositifs sont mis en place pour l'injection du chlore à savoir :

- Pompe doseuse électromagnétique
- Générateur de chlore portable
- Electropompe supprimeur
- Appareils de contrôle pour la mesure de chlore résiduel quotidien (plaquette chlore résiduel, 2 cuvettes de comparateur, 1 comparateur standard)



Figure 40 : Dispositif WATALYS

9 Système d'exhaure

Le pompage de l'eau souterraine requiert l'installation d'un système d'exhaure qui, grâce à l'énergie mécanique qu'il apporte, permet de remonter l'eau vers un point de refoulement plus haut. Généralement, ce système repose sur le fonctionnement d'une pompe qui doit être adéquate aux conditions et contexte du projet.

9.1 Choix de la pompe

9.1.1 Type de pompe

9.1.1.1 Selon la position

Le type de pompe est déterminé à partir de la valeur du niveau dynamique (Nd) du forage.

Nd < 6m	Pompe de surface
10m < Nd < 100m	Pompe immergée centrifuge
Nd > 100m	Pompe immergée volumétrique

Les projets réalisés au niveau de la région Atsimo Andrefana en partenariat avec Experts-Solidaires font appel à des pompes immergées centrifuges. Elles sont équipées d'une roue faisant un mouvement de rotation pour fournir une énergie cinétique à l'eau captée. Ces pompes présentent l'avantage de fonctionnement automatique sans l'intervention d'un agent, évitant ainsi les contraintes de surveillance grâce à un tableau de contrôle et un interrupteur flotteur. La hauteur d'aspiration d'une pompe immergée est nulle puisque la prise d'eau est immergée dans l'eau.

9.1.1.2 Selon l'alimentation en énergie

Pour les pompages destinés à l'adduction en eau potable, il existe deux sortes de pompes :

	Avantages	Inconvénients
Pompe standard	Moins onéreuse S'alimente par courant alternatif Utilisation et maintenance maîtrisées par les techniciens sur place Pièces de rechange faciles à trouver	Nécessite des dispositifs d'ondulation en cas d'utilisation de l'énergie solaire
Pompe solaire à courant continu	Taux d'intervention réduit vu le peu de pièces d'usure et donc coût d'entretien réduit Utilisent l'énergie solaire sans besoin d'un autre dispositif de transformation Meilleur rendement que la pompe standard	Pas ou peu de maîtrise de maintenance par les techniciens En général plus onéreuse Nécessité d'un dispositif de conversion d'énergie en cas d'utilisation d'un générateur

Grundfos est l'une des marques de pompes standards les plus répandues à Madagascar. De plus, leur utilisation est facile et maîtrisée par les techniciens locaux.

Lorentz est l'un des importants fournisseurs de pompes solaires Madagascar. Pour dimensionner ses pompes, Lorentz a développé un logiciel « Lorentz Compass » qui en fonction des données de l'installation (débit, HMT et de l'ensoleillement du site) propose une gamme de pompes et les différents dispositifs nécessaires à leur bon fonctionnement. Ce logiciel n'est pas gratuit et disponible chez les revendeurs de cette marque

9.1.2 Dimensionnement

Pour choisir la pompe la plus adaptée aux exigences du projet, il faut déterminer certains paramètres à savoir :

9.1.2.1 Débit de pompage

Comme énoncé dans la partie « Préambule », il est déterminé à partir de la demande en eau de la population à l'horizon souhaité et de la durée de pompage fixée. Si les aquifères captés ne permettent pas de satisfaire ce débit de pompage, il sera égal au débit d'exploitation maximal fourni par ces aquifères. Par ailleurs, on peut chercher une autre solution pour répondre au besoin journalier de la population (augmenter la durée de pompage, recourir à un deuxième forage, etc).

Etant donné qu'une pompe a une durée de vie qui varie entre 5 ans et 7 ans, il est conseillé de dimensionner le système d'exhaure sur cette base et considérer le besoin journalier de la population d'ici là.

9.1.2.2 Hauteur manométrique

Elle traduit l'énergie que la pompe doit apporter pour refouler l'eau à une certaine hauteur et est calculée à partir de la formule :

$$HMT = H_{\text{géométrique}} + P_{dc} + P_{min}$$

$H_{\text{géométrique}}$: différence entre l'altitude de refoulement et celle d'aspiration,

P_{dc} : correspondant aux pertes de pressions et aux frottements dans les tuyaux entre l'aspiration et le refoulement,

P_{min} : pression minimale au point le plus défavorable du réseau.

Pour chaque pompe, le fournisseur donne une courbe caractéristique. Elle représente le débit de pompage que la pompe peut fournir en fonction de la HMT. Quand on a à sa disposition le débit de pompage et la HMT nécessaires pour notre installation, on peut déduire les pompes présentes dans le marché susceptibles d'être adéquates au projet.

9.1.2.3 Risque de cavitation pour les pompes de surface

Dans le cas d'une pompe de surface, on doit étudier la valeur de NPSH (Net Positive Suction Head) disponible à l'aspiration de la pompe lors de sa mise en service et la comparer avec le NPSH requis de la pompe définie par le fournisseur. Le NPSH disponible d'une pompe est définie par

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_{aspiration}}{\rho * g} - \frac{P_{vap}}{\rho * g}$$

$P_{aspiration}$: pression au niveau de l'aspiration

P_{vap} : pression de vapeur saturante

Pour éviter un problème de cavitation, qui est un phénomène d'apparition de bulles de vapeur au niveau de l'aspiration de la pompe, il faut vérifier la condition suivante :

$$NPSH_{disponible} > NPSH_{requis}$$

Cette condition permet de déterminer la pression minimale nécessaire à l'aspiration pour son fonctionnement normal.

9.1.2.4 Puissance et rendement d'une pompe

La puissance hydraulique communiquée au liquide lors de son passage à travers la pompe est donnée par la formule :

$$P_{hydraulique} (W) = \frac{\rho(kg/m^3) * g(m/s^2) * Q(m^3/h) * HMT(m)}{3600}$$

Puisqu'il s'agit de l'eau, l'on peut fixer la valeur de $\frac{\rho(kg/m^3) * g(m/s^2)}{3600} = 2,725 \text{ SI}$

Cependant, du fait de la présence de frottements des organes de rotation, la puissance absorbée par la pompe est différente de la puissance hydraulique réellement consommée. Elle est égale à :

$$P_{absorbée} = \frac{P_{hydraulique}}{\eta}$$

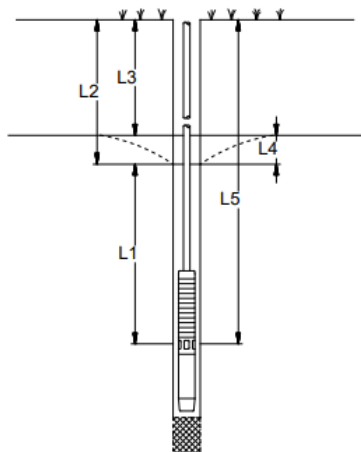
η étant le rendement global de la pompe et égal au produit du rendement du moteur et du rendement de la pompe. Il est en général compris entre 0,4 et 0,8 pour les pompes centrifuges.

Une courbe de puissance est fournie avec chaque pompe et qui renseigne sur l'évolution des puissances, hydraulique et absorbée, de la pompe en fonction du débit pompé.

Dans la pratique, pour dimensionner une pompe on se réfère aux abaques (courbe caractéristique, courbe de puissance et courbe de rendement) fournis par les fournisseurs de pompes.

9.1.2.5 Autres paramètres

Avant de choisir la pompe adéquate, il faut vérifier : la disponibilité des pièces détachées de la pompe dans la zone de son installation, sa facilité de maintenance et son adaptation aux caractéristiques de l'eau pompée (pH, température, conductivité électrique, etc).



9.2 Position d'une pompe immergée

Une pompe immergée doit être positionnée au-dessus des parties captantes ou dans une chambre de pompage. Dans un forage, il est préférable que la prise d'eau de la pompe soit placée à environ 1m minimum au-dessus des crépines. Ceci permettra une meilleure aspiration et évitera le colmatage et l'endommagement de la pompe suite à la présence des particules.

Par ailleurs, il ne faut jamais installer une pompe dans les crépines pour éviter des vitesses d'entrée trop fortes qui peuvent entraîner des particules fines avec l'eau pompée. La vitesse maximale admise est de l'ordre de 0,03 m/s. Quant au niveau dynamique

induit par le débit d'exploitation maximum, il doit être stable 1m au-dessus de la pompe.

9.3 Equipement de pompage

- Conduite d'aspiration : Tuyau assurant le transport de l'eau souterraine vers la pompe. La vitesse maximale préconisée est de 1,5 m/s. Il faut veiller à bien choisir le matériau utilisé de façon à avoir une étanchéité ne présentant pas de contre-pentes vers l'orifice de la pompe.
- Dans le cas d'installation d'une pompe immergée, il n'y a pas besoin d'une conduite d'aspiration.
- Conduite de refoulement : Tuyau allant de la pompe à l'ouvrage de stockage. Il convient de respecter une vitesse d'écoulement d'eau ne dépassant pas les 3 m/s,
- Clapet anti-retour : Organe qui permet d'éviter le risque de reflux en cas d'arrêt brusque de fonctionnement du système d'énergie. Il est installé au niveau de l'orifice de la conduite de refoulement ou intégré dans la pompe. Il est fortement conseillé d'utiliser des types de clapet avec ressort intérieur ou doté d'obturateur à ogive pour atténuer l'effet de coup de bélier,
- Compteur : Installé sur la conduite de refoulement pour relever la quantité d'eau pompée,
- Protection anti-bélier : elle se présente généralement sous forme de soupape ou d'un bidon capteur de résonance. Elle est installée en aval du compteur afin de protéger la conduite de refoulement et la pompe contre la surpression, en cas d'arrêt brusque de la pompe,
- Coude : pour assurer le transport de l'eau pompée après changement d'orientation,
- Vanne : Organe permettant de réguler le débit passant dans la conduite de refoulement,
- Boîtier de commande/ Contrôleur : permettant l'arrêt de la pompe (si le niveau de l'aquifère est trop bas ou si le niveau statique souhaité n'est pas atteint au démarrage de la pompe ou si le réservoir est plein) et le démarrage automatique de la pompe (si le niveau d'eau dans le réservoir n'atteint pas le niveau minimal requis),
- Flotteur : installé dans le réservoir et relié au boîtier de commande. Il envoie un signal au boîtier de commande renseignant sur le niveau d'eau dans le réservoir. Un flotteur peut être mécanique ou électrique,
- Sondes de niveau d'eau : Pour détecter le niveau d'eau dans le forage et le communiquer au boîtier de commande.

Le dimensionnement de ces équipements et le choix de leurs matériaux doivent s'adapter au maximum aux exigences du site étudié et de la pompe installée. En ce qui concerne la conduite de refoulement, il est conseillé de mettre en place un tube en PE en couronne du fait des débits de pompage faibles et



Figure 41 : Coude et début conduite de refoulement



Figure 42 : Conduite de refoulement protégée



Figure 43 : Clapet anti retour



Figure 44 : Compteur de production



Figure 45 : Vue d'intérieur d'un boîtier de commande d'une pompe standard



Figure 46 : Boîtier de commande d'une pompe solaire



Figure 47 : Flotteur



Figure 48 : Sonde

d'importantes valeurs de profondeur de forages. Il est par ailleurs préférable de choisir un tube PE conditionné à 16 bars même si la pression ne le justifie pas pour qu'en cas de rupture du filin de suspension de la pompe, le tube PE pourra temporairement assurer l'accrochage du groupe d'exhaure

10 Système d'énergie du système d'exhaure

Le fonctionnement du moteur de la pompe nécessite la présence d'un système pour l'alimentation en énergie. Comme énoncé dans la partie précédente, une pompe a besoin d'une puissance minimale ($P_{\text{absorbée}}$) pour pomper l'eau dans les meilleures conditions.

10.1 Différents types de système d'énergie

Il existe différents systèmes d'énergie utilisant chacun un type de source d'énergie.

- Energie hydraulique (Roue à aube) : nécessite la présence d'une vitesse minimale dans le cours d'eau et la hauteur de refoulement qu'il assure est faible.
- Energie solaire : récupérée grâce à l'ensoleillement du site et fait appel à des panneaux solaires
- Energie éolienne : sa source est le vent et nécessite l'installation des éoliens de grandes tailles
- Energie thermique : assurée via un groupe électrogène à gasoil
- Energie du réseau électrique : fournie par un réseau d'électricité (par exemple JIRAMA à Madagascar)

Dans la région Atsimo Andrefana, on a recours au système solaire ou thermique du fait de l'importance de l'énergie requise pour pomper l'eau dans les forages. L'énergie du réseau électrique est souvent évitée de l'absence ou des nombreuses coupures du réseau JIRAMA (Compagnie Nationale d'Electricité). Ci-après sont présentés les différents avantages et inconvénients de ces deux options :

	Avantages	Inconvénients
Energie thermique	Coût d'investissement faible Débit et HMT non limités Disponibilité des pièces de rechanges Capacités locales de maintenance Fonctionnement à la demande (flexibilité)	Coût d'exploitation élevé Difficulté logistique pour le transport du gasoil et pour sa sécurisation Nécessite un gardien lors des heures de fonctionnement Niveau sonore élevé Source d'énergie polluante Durée de vie plus faible, pannes fréquente
Energie solaire	Coût d'exploitation faible Fonctionnement au fil du soleil (sans accumulateur), énergie transmise directement à la pompe immergée Energie propre et disponible Niveau sonore nul Fiabilité et simplicité de l'installation Aucun entretien mis à part le nettoyage des panneaux Aucune panne du générateur	Coût d'investissement élevé Nécessite une surface importante si HMT et débit importants Disponibilité des pièces de rechange Technicité de la maintenance Variation journalière du débit Nécessite un réservoir plus grand pour lutter contre les variations de débit journalier Risque de vol et de casse des panneaux

10.2 Dimensionnement des deux options

10.2.1 Groupe électrogène

Un groupe électrogène est un système reposant sur le fonctionnement d'un moteur qui transforme l'énergie thermique (gasoil) en énergie électrique. Il en résulte alors que pour limiter la consommation horaire du gasoil (fonction de la quantité d'eau pompée et de la durée de pompage), il faut optimiser le dimensionnement du groupe électrogène.

10.2.1.1 Puissance et vitesse

Avant l'achat d'un groupe électrogène, il faut s'assurer que sa puissance est bien supérieure à la puissance mécanique nécessaire pour faire marcher la pompe. Il est même préférable que la puissance du groupe soit au moins 3,5 fois supérieure à la puissance de la pompe pour répondre au pic d'énergie au démarrage, même on préfère des générateurs à vitesse lente (1500 tours/minute) au lieu de générateur à vitesse rapide (2500 – 3000 tr/minute) car leur durée de vie est plus importante



Figure 49 : premier groupe électrogène à Saint Augustin

Les fournisseurs des groupes électrogènes mettent à disposition du client certains paramètres (données ci-contre) pour choisir le groupe électrogène le plus adéquat à l'installation d'exhaure.

Puissance max kW (ISO 8528)
Puissance max kVA (ISO 8528)
Type d'alternateur
Volume du réservoir
Autonomie (en heures)
Type et poids

10.2.1.2 Pour une optimisation du dimensionnement

Pour l'optimisation de la performance d'un groupe électrogène, il est conseillé de :

- Acheter le groupe d'un fournisseur assez répandu pour faciliter l'approvisionnement en pièces détachées, (par exemple YAMAHA et SDMO),
- Préférer un générateur à vitesse lente (1500 tours/minute)
- Assurer un entretien régulier. Il faut vérifier le niveau d'huile tous les 15 jours, nettoyer le filtre à air et le filtre à carburant et vidanger le groupe électrogène tous les 50 heures. Pour les bougies, il faut les nettoyer tous les six mois et les remplacer au moins une fois par an,
- Fermer la vanne au niveau de la conduite de refoulement avant le démarrage du groupe.

10.2.1.3 Points d'attention

Un des problèmes majeurs de ce type de système d'alimentation en énergie est son coût d'exploitation élevé. Un simple dysfonctionnement de la pompe, une fuite au niveau de la conduite de refoulement ou un mauvais dimensionnement du groupe peuvent engendrer une forte augmentation de la consommation de gasoil. De plus, souvent dans les communes rurales de la région Atsimo Andrefana, il est difficile de s'approvisionner en gasoil car les fournisseurs se trouvent dans les villes et les transports en commun ne sont pas toujours disponibles pour s'y rendre. Par conséquent, une discontinuité du service d'eau peut être engendrée en cas de problèmes logistiques.

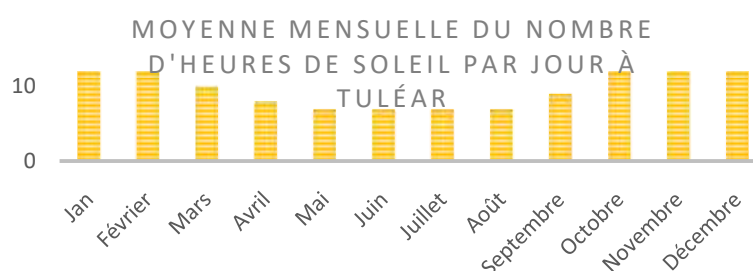
10.2.2 Energie solaire

Ce système fait appel à des panneaux voltaïques qui sont composés de cellules dont l'assemblage permet de fournir de l'énergie électrique à partir de la lumière du soleil. Le courant produit est continu. Avec ce système d'énergie, il y a possibilité de stocker de l'énergie dans des batteries pour pouvoir pomper l'eau toute la journée, même en dehors de la période d'ensoleillement. Cependant, l'utilisation de batteries a plusieurs inconvénients parmi lesquels :

- Un coût élevé,
- Requier un contrôle régulier et donc une bonne maîtrise de la part du personnel sur place,
- Produit beaucoup de déchets,
- Nécessite le remplacement régulier des batteries utilisées.

Pour remédier à ces problèmes, il est conseillé de pomper au fil du soleil, c'est à dire sans faire appel à des batteries. Le captage de l'énergie solaire se fait uniquement durant la période de fort ensoleillement afin de pomper l'eau et la stocker dans le réservoir d'eau pour pouvoir assurer la distribution toute la journée et notamment le soir et le matin tôt. Le dimensionnement du réservoir doit alors tenir en compte cette contrainte.

La région Atsimo-Andrefana est caractérisée par des périodes de fort ensoleillement. Sur la journée, la moyenne mensuelle du nombre d'heures de soleil par jour varie entre 9,6 et 10,4 heure/jour. Le recours à l'énergie solaire pour l'alimentation en énergie est alors bien justifié.



<https://www.partir.com/Madagascar/Toliara/1055429/quand-partir.html>

10.2.2.1 Puissance de crête

Pour que les panneaux solaires soient efficaces, ils doivent être conçus de manière à fournir une énergie au moins égale à l'énergie journalière consommée par la pompe. On ajoute une marge de 15%

pour tenir en compte les pertes. P_c est la puissance crête totale des panneaux solaires et traduit leur capacité à fournir de l'énergie, elle est définie comme suit :

$$P_c(W) = \frac{E_{elec}(Wh/j)}{EI(h/j) * K}$$

E_{élec} : Energie électrique nécessaire pour le fonctionnement de la pompe,

EI : traduit l'ensoleillement du site durant l'année pour un éclairement puissance constante 1000 W/m² fixée par les constructeurs des panneaux solaires,

K : le rendement du système d'alimentation fourni par le concepteur, il est compris entre 0,7 et 0,9.

Les panneaux solaires ont une durée de vie qui va jusqu'à 25 ans en général. Leur rendement diminue au fur et à mesure des années. Il est estimé à 97% pendant la première année, à 90% à 10 ans et à 80% à la fin de vie (25 ans).

Par ailleurs, il est conseillé de considérer la période de l'année la moins ensoleillée pour se situer au cas le plus défavorable.

10.2.2.2 Autres paramètres

Avant de déterminer le type et le nombre de panneaux solaires nécessaires pour le système en question, on doit connaître la tension de fonctionnement de la pompe et déterminer ainsi le couplage des panneaux à utiliser (en série, en parallèle ou une combinaison des deux).

Il est à rappeler qu'avec un montage en série des panneaux, on obtient la somme la somme des tensions (Volts) des panneaux, alors qu'avec un montage en parallèle, on obtient la somme des intensités (Ampères) avec une tension constante.

Ayant décidé le couplage des panneaux voltaïques adéquat pour l'installation et leur puissance unitaire, l'on peut déduire le nombre de panneaux à mettre en place. Pour une meilleure optimisation du système des panneaux solaires, il est recommandé d'utiliser la même marque et la même puissance de l'ensemble des panneaux solaires utilisés.

Les deux derniers paramètres à vérifier avant d'installer les panneaux solaires sont leur orientation et leur inclinaison par rapport à l'horizontale.

Orientation : Au cas où on se situe dans l'hémisphère Nord, il convient d'orienter les panneaux en plein sud, dans le cas contraire ils doivent être orientés plein nord.

Inclinaison : Trois cas sont rencontrés :

Latitude	Valeur de l'inclinaison
Inférieure à 20°	= Latitude*
Entre 20° et 35°	= Latitude + 10°
Entre 30° et 40°	= Latitude + 15°

*La valeur minimale est de 15° afin d'assurer l'auto-nettoyage

Il existe une plateforme « pvgis » (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>) qui, en fonction de l'emplacement et la puissance des panneaux photovoltaïques prévus d'être mis en place dans le site, elle donne l'angle optimal de l'inclinaison des panneaux solaires. (Il est égal à 25° pour le cas de la région Atsimo Andrefana).

De plus, cette plateforme fournit aussi la valeur du paramètre E_d qui, en fonction de la puissance d'un panneau solaire (choisi au préalable), renseigne sur la puissance fournie par qui va fournir une fois installée sur le site choisi.

10.2.2.3 Accessoires des panneaux solaires pour le pompage

Le fonctionnement des panneaux solaires nécessitent la mise en place d'un minimum d'appareillage.


Régulateur

Un dispositif permettant de réguler la tension de sortie des panneaux solaires et l'adapter à la tension de la pompe pour protéger la pompe contre les sous-tensions et surtensions qui peuvent apparaître. Le régulateur de charge de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet d'obtenir la puissance maximale possible des panneaux solaires.

Onduleur

Un dispositif qui convertit la tension continue en sortie des panneaux en une tension alternative pour le fonctionnement de pompes à courant alternatif. Son dimensionnement est basé sur la puissance nominale de la pompe et son intensité I_{2N} doit être supérieure ou égale à l'intensité de la pompe I_N . De plus, la tension fournie par l'ensemble des panneaux solaires doit être comprise dans la marge de tension que permet d'accepter l'onduleur.

Un onduleur peut être composé d'un contrôleur simple ou d'un variateur. Chaque installation a des avantages et des inconvénients

	Avantages	Inconvénients
Contrôleur simple	Coût faible Maîtrisé par les techniciens	La pompe démarre dès que le voltage aura atteint sa valeur minimale même en présence d'une irradiation solaire insuffisante pour un fonctionnement normal de la pompe La pompe risque de tourner pour des petits débits mais avec de grandes contraintes mécaniques et électriques La durée de la pompe diminue
Variateur 	Attribution d'un seuil de puissance disponible Variation du temps le temps d'attente de redémarrage en fonction de l'irradiation solaire Le réglage de la phase d'accélération et décélération Programmation des délais	Plus onéreux Nouveau concept pour les techniciens

	d'attente de la sonde pour le remplissage du réservoir Réglage du débit de pompage en faisant varier la fréquence du moteur (utile dans le cas d'une intrusion saline) La détection du pompage à sec de la pompe se fait par diminution du couple et ne nécessite pas la pose d'une sonde supplémentaire Ne nécessite pas de batterie	
--	--	--

Fusibles

- Entre les panneaux solaires et l'onduleur : Son intensité doit être dimensionnée de façon à être 1,5 fois plus grande que l'intensité des panneaux voltaïques afin d'assurer leur protection
- Entre la pompe et l'onduleur : il est déduit à partir du modèle de l'onduleur choisi.

Disjoncteur

Deux disjoncteurs doivent mis en place entre les panneaux solaires et onduleur, et entre l'onduleur et la pompe pour assurer leur protection. Il est fortement conseillé de les mettre avant les fusibles en partant de l'onduleur.

Anti-foudre, anti-surtensions

Pour protéger les appareils de toute décharge électrique susceptible d'apparaître, il serait judicieux d'installer une protection contre les surtensions au niveau de chaque entrée de capteur du contrôleur.

Autres équipements

Pour le cas des pompes solaires, la marque de Lorentz propose les dispositifs suivants :

- SunSwitch qui permet lui aussi le démarrage de la pompe en fonction d'une certaine intensité lumineuse,
- SunSensor module pour protéger la pompe des arrêts et démarrages intempestifs,
- PowerPack : permet d'utiliser un groupe électrogène,
- SolarTracker pour réglage de l'orientation.



Figure 50 : SurgeProtector (Disjoncteur)



Figure 51 : Sunswitch

10.3 Protections

Les systèmes d'exhaure et d'énergie sont exposés au risque de vandalisme, de détérioration de la part des personnes malveillantes, des animaux ou de crues d'inondations que peut connaître le site. Il faut alors penser à mettre en place un système de protection assurant la sécurité des installations.

La pompe étant protégée par l'équipement de forage, il est souhaitable de renforcer la protection en construisant un abri forage. Le boîtier de commande et le disjoncteur sont à installer au niveau de l'abri gardien.

Le groupe électrogène est souvent mis dans un abri gardé. Quant aux panneaux solaires il est recommandé de les entourer avec une clôture pour empêcher l'accès des personnes non autorisées et des animaux. Si une clôture électrifiée est installée, il convient de mettre une plaque au niveau du grillage pour informer les passagers de la présence d'un danger.

Ci-dessous sont présentées les protections des systèmes d'exhaure de quelques communes dans la région Atsimo Andrefana.



Figure 52 : protection de forage de saint Augustin



Figure 53 : Protection de forage du chef-lieu Ambohimahavelona



Figure 54 : Protection de forage à Ambahikily



Figure 55 : Local de protection du forage et système d'exhaure A Ambahikily

10.3.1 Installation « pompe standard + panneaux solaires » à Ambahikily

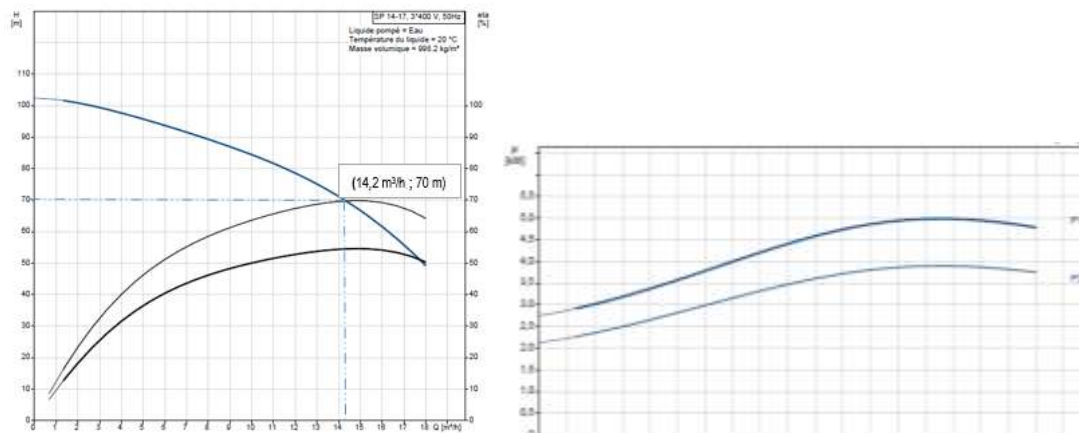
A Ambahikily, il n'existe pas de réseau électrique (JIRAMA). De plus, le débit de pompage étant important (14 m³/h), il a été décidé d'utiliser un système d'énergie solaire via l'installation des panneaux photovoltaïques.

Deux offres différentes ont été proposées au MO par deux prestataires, à savoir Solarmad (pompe volumétrique à courant alternatif) et SqVision (pompe volumétrique à courant continu). Alors que le premier proposait une pompe standard, le deuxième a proposé une pompe solaire.

La maîtrise d'ouvrage a décidé d'opter pour l'installation d'une pompe à courant alternatif du fait des avantages qu'elle présente (maintenance et remplacement facile de la pompe, qui peut s'alimenter via un groupe électrogène en cas de panne des panneaux solaires, etc).

La pompe standard choisie est une Grundfos qui permet de fournir, pour une HMT de 70 m, un débit de pompage de 14,2 m³/h. La référence du modèle est **SP 14-17 – 98826898**. Cette pompe est alimentée par les panneaux solaires via un Onduleur-Régulateur ABB ACS355 (photo ci-dessous) qui permet d'adapter l'alimentation de la pompe en fonction de l'ensoleillement.

Ci-dessous sont présentées les courbes, caractéristique et de puissance, de la pompe utilisée à Ambahikily (Grundfos **SP 14-17 – 98826898**).



P_1 est la puissance absorbée et P_2 est la puissance hydraulique.

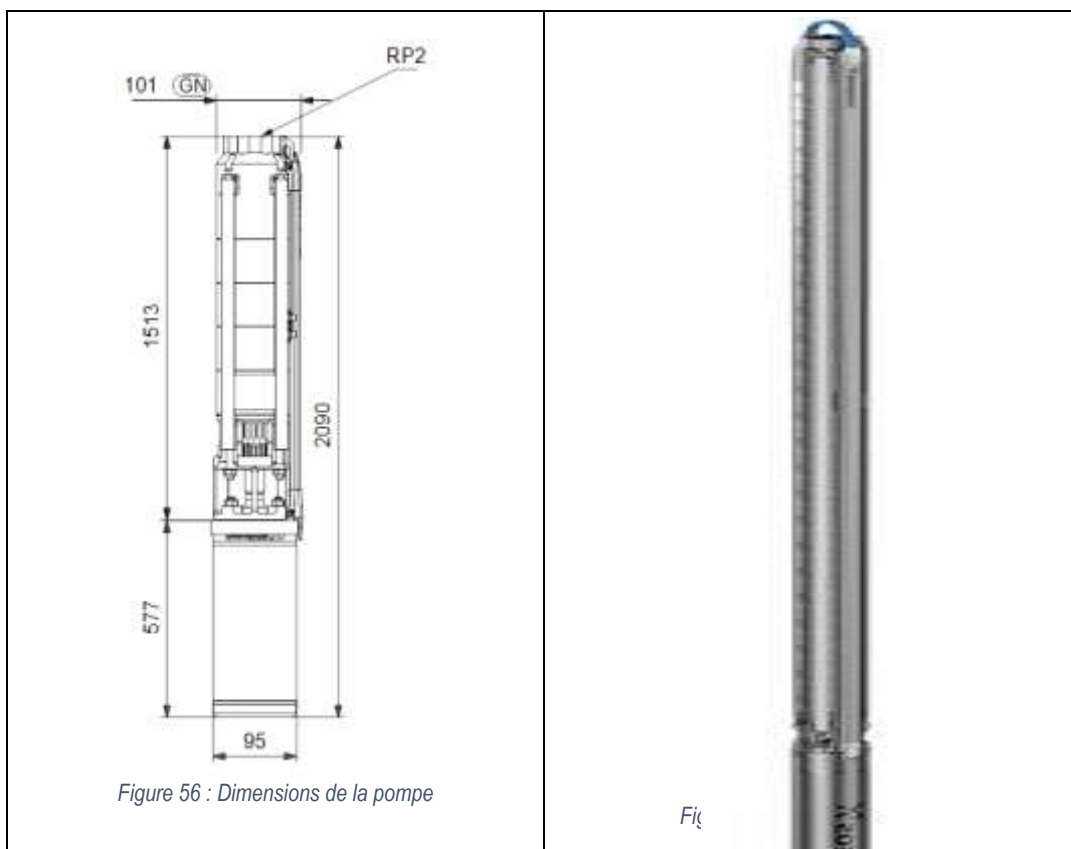


Figure 56 : Dimensions de la pompe

Fig

<https://fr.grundfos.com/>

18 panneaux solaires ont été mis en place à proximité du réservoir, du forage et de l'abri gardien pour fournir une puissance totale de 5 400 W. L'installation de ce système d'exhaure a nécessité la mise en place des dispositifs suivants :

- 01 Tableau de commande,
- 01 flotteur (float switch),
- 01 mesure du niveau d'eau,
- 01 protection anti-foudre,
- 01 disjoncteur,
- 01 support de panneau et fixation au sol,
- Une clôture anti-zébu en grillage de périmètre 50 m et de 1,5m de hauteur,
- Contrôleur ABB ACS355 4Kw,
- Surge protector,
- PV disconnect 440-40-6,
- Midnite surge protector triphasé.

Le contrôleur ABB ACS355 4Kw est un onduleur variateur qui s'adapte avec la majorité des pompes monophasées et triphasées, qu'elles soient alimentées en énergie solaire ou thermique.

Les fils électriques ont été protégés par des tuyaux PEHD et ceux enfouis ont respecté une profondeur égale à au moins 60 cm.

Par contre, le délégataire doit mettre en place une affiche indiquant la présence d'un courant électrique au niveau de la clôture électrifiée des panneaux solaires.



Figure 58 : réservoir et système d'énergie à Ambahikily



Figure 59 : 18 panneaux solaires



Figure 60 : grillage pour protection des panneaux solaires

10.3.2 Installation « pompe solaire + panneaux solaires » à St Augustin

En 2010, il a été choisi d'installer le modèle de pompe Pentax 4S10-19. De diamètre 96 mm et de puissance 2,2 kW. Son alimentation était assurée par un groupe électrogène Diesel de la marque SDMO référencé TRI DX 6000TE, 2500 Tours/minute.



Figure 61 : Pompe standard mise en place à Saint Augustin en 2010



Figure 62 : Installation de la pompe à Saint Augustin

Lors des travaux de pose du système d'exhaure, la pompe avait été positionnée au droit de la crépine, par conséquent la performance de la pompe diminuait à cause de l'entrée des particules à la partie de prise d'eau de la pompe. De plus, le groupe électrogène rencontrait des problèmes de défaillances régulières et de difficultés d'approvisionnement en gasoil en (termes de transport et de coût), il a été décidé, fin 2016, alors d'installer des panneaux solaires avec le soutien de la Fondation EDF.

Installation solaire :

Pour satisfaire les besoins de la population de Saint Augustin, la pompe devait refouler un débit de 7,8 m³/h à partir d'un forage de profondeur 6,55 m à une hauteur manométrique de 59 m.

Après traitement des offres des prestataires à savoir, SqVision, Solarmad et Energie Technologie, celle de SqVision qui a été retenue. Elle reposait sur l'installation d'un système d'exhaure totalement solaire faisant appel à une pompe Lorentz référencée **PS2-1800 C-SJ5-12** et des dispositifs suivants :

- 01 contrôleur MPPT avec data-module
- 08 panneaux solaires d'une puissance totale de 2400 watt et accessoires
- 01 robinet flotteur
- 01 module de démarrage de la pompe suivant l'intensité lumineuse
- 01 protection anti-foudre
- 01 disjoncteur
- 01 support de panneau et fixation au sol;
- 01 clôture électrique Nemtek avec alarme

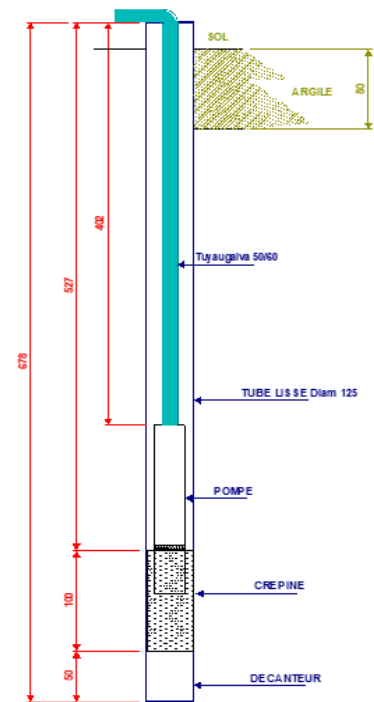


Figure 63 : panneaux solaires



Figure 64 : Protection des câbles électriques

D'après l'expérience de Saint Augustin, il a été noté que le système Lorentz présente l'inconvénient d'être un système captif, à courant continu 48 Volts qui nécessite un câblage de grosse section

Par contre, Lorentz propose un accès à une application « Pumpscanner » qui permet de réaliser un suivi en temps réel du système d'exhaure. Toutefois ceci nécessite l'acquisition d'un smartphone, ce qui n'est pas toujours le cas pour les techniciens et gérants sur place.

11 Système de stockage

En vue d'assurer la continuité de service au niveau d'un réseau d'AEP, une réserve en eau stockée doit être toujours disponible. Cette réserve constitue un tampon entre le volume mobilisé à partir de la source et le volume distribué.

Le débit d'adduction est quasiment constant et bien situé dans le temps par contre celui de distribution est variable au cours de la journée. Le réservoir permet alors une accumulation du surplus d'eau aux heures de faible consommation et sa restitution pendant les heures de forte consommation.

En effet, cet ouvrage permet à la fois de s'adapter aux variations horaires de la consommation en particulier en période de pointe, de maintenir une pression minimale au point le plus défavorable du réseau (le point le plus haut) et de pouvoir réparer la partie adduction du réseau sans interrompre la distribution de l'eau aux usagers.

La durée de vie d'un réservoir d'eau est fonction de sa matière, la durée d'un réservoir en béton est estimée entre 50 et 100 ans, celle d'un réservoir en acier entre 30 et 50 ans, celle d'un réservoir en PEHD entre 15 et 25 ans.

11.1 Types de réservoir d'eau potable

En fonction des moyens financiers, des compétences techniques disponibles et des contraintes liées au terrain d'implantation, le choix du type du réservoir d'eau potable est fait.

11.1.1 En terme de hauteur

Il est communément acquis que la pression d'eau dans les maisons, en zone rurale doit être de 5 mètres minimum (0,5 bars) sur la maison la plus éloignée du réservoir. C'est-à-dire que la hauteur du réservoir doit être au moins égale à 5 mètres plus la perte de charge calculée à la dernière maison.

11.1.1.1 Réservoir sur tour (château d'eau)

C'est un réservoir d'eau construit en hauteur pour augmenter la charge de l'eau présente dans la cuve et donc la pression dans le réseau. Ce type d'ouvrage est construit dans le cas de sites ayant un relief relativement plat ou dans les sites où l'altitude du point le plus haut n'est pas suffisant pour desservir toutes les habitations.

11.1.1.2 Réservoir semi-enterré/ enterré

Réservoir d'eau partiellement/totalement enterré dans le sol d'implantation, situé sur un point haut par rapport à la zone à desservir

11.1.1.3 Réservoir au sol

Réservoir d'eau dont l'altitude de son radier est égale à l'altitude de terrain sur lequel est construit. On a recours à ce type de réservoir d'eau dans sur les sites vallonnés présentant des altitudes importantes pour distribuer l'eau gravitairement.

Les avantages et inconvénients de chacun de ces réservoirs d'eau sont présentés dans le tableau ci-après.

	Avantages	Inconvénients
Château d'eau	Création d'un point haut en terrain plat	Stockage limité Coût de construction élevé Nécessite de l'entretien Forte vulnérabilité au risque sismique Exposé au problème de développement de bactéries à cause de la variation important des températures journalières
Réservoir enterré ou semi enterré	Stockage moins limité et coût moins élevé que le château d'eau Intégration plus facile dans le paysage Température de l'eau stockée relativement constante	Leur mise en place dépend de la nature du sol sur site et de son effet sur le matériau utilisé du réservoir
Réservoir au sol	Moins onéreux que les autres type se réservoir d'eau	Souvent difficile à construire car l'accès au site d'implantation est difficile ou impossible



Figure 65 : Château d'eau



Figure 66 : Réservoir semi-enterré



Figure 67 : Réservoir enterré



Figure 68 : Réservoir au sol

11.1.2 En terme de matériau de construction

Selon les contraintes auxquels fait face le réservoir d'eau potable, il peut être en béton armé, en métal, en plastique ou en fibre de verre. Chacun de ces types de réservoirs d'eau présente des avantages et des inconvénients.

	Avantages	Inconvénients
Béton armé	<p>Disponibilité des matériaux (sable, ciment, granulats) sur place</p> <p>Durée de vie importante</p> <p>Facilité d'entretien</p> <p>Construction sur place par les entreprises de travaux</p>	<p>Coût d'investissement élevé</p> <p>Mise en œuvre difficile nécessitant une bonne maîtrise de mobilisation de matériaux et de personnel compétant</p> <p>Nécessite une étude de génie civil ainsi qu'une analyse de sol (portance)</p> <p>Risque de mauvaise étanchéité</p> <p>Finition délicate à mettre en œuvre</p> <p>Sa construction nécessite un échafaudage lors des travaux</p> <p>Contraintes à la fissuration et aux fuites</p> <p>Requiert la vérification de l'agressivité⁸ de l'eau stockée</p>
Métal	<p>Coût d'investissement modéré</p> <p>Fabrication hors site</p> <p>Construit à partir de pièces préfabriquées dans les usines de production</p> <p>Bonne étanchéité</p> <p>Nécessite peu de béton pour les fondations</p> <p>Temps de montage court par rapport à un réservoir en béton armé</p>	<p>Coût d'investissement, d'entretien et maintenance élevés (peinture)</p> <p>Mis en œuvre difficile</p> <p>Difficile à entretenir car le métal est sensible à certains produits (javel, etc)</p> <p>Risque de corrosion avec le temps</p> <p>Peut donner un goût métallique à l'eau stockée</p> <p>Risque de transmission de chaleur dans les sites fortement ensoleillés</p>
Plastique	<p>Légèreté</p> <p>Facile à transporter</p>	<p>Durée de vie faible</p> <p>Peut se briser au fil en temps à cause du temps et du soleil</p>
Fibre de verre	<p>Légèreté</p> <p>Economique à long terme pour les systèmes à moyenne et grande capacité</p> <p>Pas de détérioration et de corrosion (ne contient aucun métal)</p> <p>Constitué de matériau non poreux donc aucune dilatation</p> <p>Moins d'entretien</p>	<p>Coûteux (5 405 euros pour un réservoir de 10 m³)</p>

⁸ Agressivité : une *eau agressive* est une eau potable qui peut provoquer une corrosion car c'est une eau naturellement acide avec une teneur élevée en anhydride carbonique.



Figure 69 : Réservoir en béton armé



Figure 70 : Réservoir plastique (Makiplast)



Figure 71 : Réservoir d'eau en fibre de verre

11.2 Dimensionnement

Le dimensionnement d'un réservoir d'eau potable nécessite de considérer les exigences hydrauliques et de génie civil auxquelles il est contraint au cours de sa mise en service.

11.2.1 Aspect hydraulique

Le dimensionnement d'un réservoir d'eau potable requiert la vérification de certains points :

- L'évolution de la consommation journalière au cours du temps,
- Le besoin journalier de pointe,
- Le risque de défaillance du réseau d'adduction et de distribution,
- La fiabilité de la ressource en eau en termes de quantité et de qualité,
- La mobilisation des énergies d'exploitation pour le remplissage du réservoir d'eau,
- Existence d'une interconnexion ou une autre ressource en eau de secours.

En effet, il n'existe pas une seule méthode de calculer la capacité de stockage d'un réservoir d'eau potable. Selon le risque que le maître d'ouvrage est prêt à courir, le volume de la cuve doit être adapté.

En milieu rural, il est souvent recommandé que la capacité de stockage du réservoir corresponde à une journée de consommation moyenne. En adoptant cette approche, on s'assure de la disponibilité de l'eau potable au moins pour une journée en cas de problèmes de qualité de l'eau brute ou de panne au niveau du système d'exhaure.

En présence de données suffisantes sur la consommation journalière de la population à desservir, on peut estimer la capacité de stockage du réservoir après avoir calculé le volume stocké à chaque période de la journée comme suit :

$$Volume\ stocké_t = Volume\ en\ entrée_t - Volume\ en\ sortie_t + Volume\ stocké_{t-1}$$

Le volume en entrée est égal au volume pompé et le volume en sortie et le volume distribué. Ayant les valeurs minimales et maximales de volume stocké, la capacité de stockage du réservoir d'eau potable est déduite.

$$Volume\ du\ réservoir = Volume\ stocké\ négatif_{max} + Volume\ stocké\ positif_{max}$$

Ensuite, on fixe les valeurs de la hauteur de la lame d'eau dans la cuve et de la section du radier de la cuve de façon à avoir des valeurs cohérentes donnant le volume de stockage calculé suivant la formule suivante :

$$V_{cuve} = S_{radier\ cuve} * H_{cuve}$$

Dans la pratique, la lame d'eau dans le réservoir d'eau potable varie entre 3 et 5 m, cet ordre de grandeur respecte deux conditions, un coût pas trop élevé et une variation de pression acceptable.

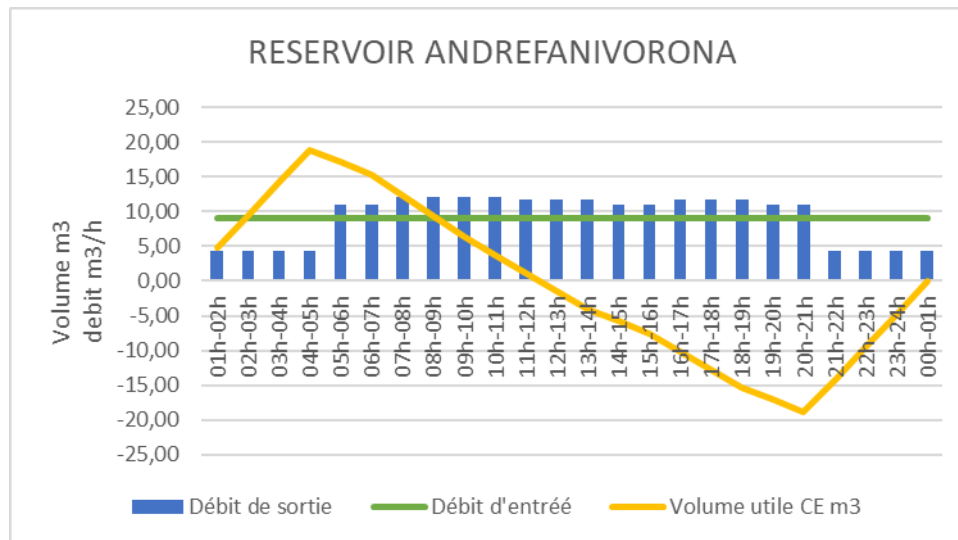


Figure 72 : exemple de calcul du volume utile d'un réservoir

11.2.2 Génie civil

11.2.2.1 Fondations

Le dimensionnement de la partie génie civil requiert la réalisation d'une étude de sol pour connaître la valeur de la charge admissible du sol. Ceci permettra de vérifier si le sol pourra supporter les charges appliquées par le réservoir d'eau potable lors de sa mise en service. La condition à vérifier est

$$\sum F < 3 * \sigma_{admissible}$$

F étant la somme de toutes les forces appliquées à la structure du réservoir d'eau.

$\sigma_{admissible}$ étant la contrainte admissible du sol.

Les forces appliquées à la structure incluent les forces permanentes (poids propre de la structure, le poids des équipements hydrauliques mis en place, étanchéité, etc) et les forces variables (charge hydraulique de l'eau stockée, charge appliquée lors des travaux d'entretien et maintenance, etc.) En outre, connaissant la portance du sol, on peut dimensionner les fondations à mettre en place pour

supporter l'ouvrage. Ensuite, en appliquant le principe de la descente de charge, les dimensions du réservoir sont déterminées.

En effet, l'étude des combinaisons des charges appliquées à l'ELU⁹ et l'ELS¹⁰, permet de déduire les sollicitations auxquelles sont contraintes les sections de l'ouvrage. Puis, le dimensionnement des armatures et du béton que nécessite ces sections se fait en suivant les règles techniques du béton armé aux états limites de B.A.E.L 91 modifiées 99 et selon le fascicule 74 relatif à la construction des réservoirs.

11.3 Emplacement du réservoir

Le choix du point d'implantation du réservoir d'eau potable doit être bien justifié : Il doit répondre essentiellement à deux exigences : être placé au niveau d'un point suffisamment haut pour que sa hauteur soit suffisante pour desservir l'eau gravitairement à toutes les habitations et se situer au centre de la zone à desservir en vue de minimiser les longueurs et diamètres des conduites. Outre, le sol supportant cet ouvrage doit répondre à certaines exigences de mécanique de sol et de sécurisation.

11.4 Composantes d'un réservoir

Pour remplir sa fonction dans les meilleures conditions, un réservoir d'eau potable est composé de :

Coupole

Couverture supérieure de la cuve, elle protège la cuve d'éventuelles infiltrations d'eaux externes et de matières parasites (rejets domestiques, oiseaux, insectes, etc). Pour le cas des réservoirs en béton armé, la coupole doit avoir une pente extérieure minimale de 1%. La pente recommandée est 2% pour permettre le ruissellement des eaux de pluie et limiter les radiations directes du soleil.

Cuve

Il s'agit de la partie du réservoir où est stockée l'eau refoulée depuis le forage. La dalle inférieure de la cuve qui supporte la cuve et l'eau y est contenue s'appelle le radier. Quant aux murs de la cuve, ils sont appelés parois. Une cuve peut être sous une forme cylindrique, tronconique, sphérique ou rectangulaire. Cependant, plus la forme des parois d'une cuve tendent à être cylindrique plus il y a une bonne répartition de pression, et une bonne résistance du vent (en particulier pour les réservoirs sur tour) évitant ainsi la présence de zones mortes dans la cuve. Par contre, la forme cylindrique est plus difficile à mettre en œuvre dans le cadre de réservoirs en béton notamment. Outre, la pente du fond de la cuve doit être supérieure à 0,5% (soit 5mm/m) pour faciliter l'évacuation des eaux et l'enlèvement des dépôts décantés lors du nettoyage de la cuve.

Dans la région Atsimo Andrefana, il est compliqué pour la plupart des entreprises de travaux de réaliser un fond courbé car leurs moyens matériels et les compétences de leur personnel sont limités à ce niveau. C'est pour cela que dans la majorité des cas, le fond de la cuve est relativement plat.

Radier

⁹ ELU : Etat limite ultime, état

¹⁰ ELS : Etat limite de service

Il s'agit du fond de la cuve. Il doit préférentiellement avoir une forme de cuvette pour permettre l'accumulation et l'évacuation des matières décantées

Fondations

C'est des ouvrages géotechniques qui permettent de transmettre au sol l'ensemble des charges appliqués au réservoir d'eau. Les fondations sont calculées en fonction de la masse du réservoir à plein, des effets latéraux, de la portance et de l'uniformité du sol. Un essai de résistance du sol est généralement nécessaire pour déterminer la taille de ces fondations.

11.4.1 Equipements hydrauliques

Certains équipements hydrauliques doivent obligatoirement être installés pour assurer les fonctions du réservoir d'eau.

Conduite de distribution

Elle est située à la sortie du réservoir pour alimenter le réseau gravitairement.

Par ailleurs, pour pouvoir distribuer l'eau potable à différentes valeurs de niveau d'eau dans la cuve et éviter d'installer un système de pompage dans le réservoir, on place la conduite de distribution au niveau bas de la cuve à environ 0,15 ou 0,20m du fond de la cuve pour éviter l'entraînement des particules décantées (boues) dans la conduite de distribution et desservir une eau turbide.

La crépine de départ de la conduite de distribution doit être placée au fond le plus éloigné de l'arrivée du remplissage (conduite de refoulement). De plus, il est fortement conseillé de mettre en place un tamis plastique à l'entrée de la conduite de distribution pour filtrer les particules qui peuvent y accéder,

Conduite de refoulement/amenée

Elle est située à l'entrée du réservoir pour assurer l'arrivée de l'eau au réservoir à partir du forage.

Les conduites de refoulement et de distribution ne doivent jamais être positionnées au même niveau de hauteur pour éviter d'avoir des courts circuits de l'eau dans la cuve et d'avoir des vibrations. Cette position permet davantage d'aérer l'eau acheminée dans la cuve et d'améliorer sa qualité et d'éviter d'éventuelle turbulence au fond de la cuve.

Il est préconisé d'utiliser le PE¹¹ 10 ou 16 bars et du PE soudé jusqu'à un diamètre 110 mm lorsque c'est possible pour les autres conduites.

Conduite du Trop-plein

Elle permet de déverser l'eau qui dépasse la hauteur maximale tolérable dans la cuve vers l'extérieur du réservoir,

Conduite de vidange

Elle permet la vidange du réservoir pour nettoyage ou en cas de réparation au niveau du réservoir. Elle se situe au fond du réservoir pour pouvoir enlever les particules décantées.

¹¹ PE :

Conduite By-pass

Conduite servant de liaison entre la conduite de refoulement et la conduite de distribution pour assurer la distribution pendant la vidange du réservoir

Compteurs

Ce sont des appareils permettant la mesure du débit d'eau passant dans la conduite en question.

Robinet-vanne

Un dispositif mis en place pour réguler la quantité d'eau passant dans le réseau

Flotteur

Il est installé dans le réservoir et relié au boîtier de commande. Il permet d'arrêter automatiquement la pompe lorsque le niveau d'eau souhaité dans le réservoir est atteint et inversement de démarrer automatiquement la pompe si le niveau d'eau dans le réservoir est trop bas.

Il est préférable de placer un flotteur de type contacteur électrique par poire basculante (figure ci-dessous) dans le réservoir d'eau potable. En présence de moyens financiers limités, on peut faire appel à un flotteur mécanique si le système d'exhaure repose sur une pompe standard.

Indicateur de niveau d'eau

Dispositif permettant de connaître le niveau d'eau présent dans la cuve.

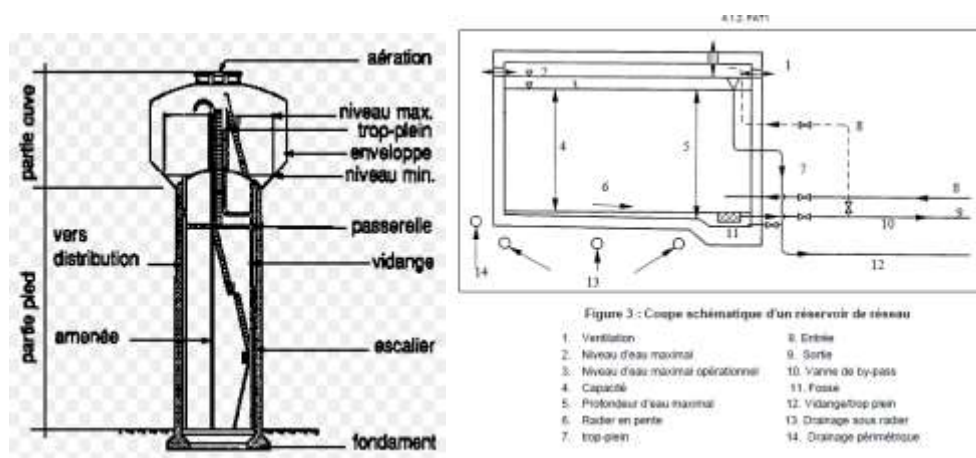
Concernant l'indicateur de niveau d'eau on peut se contenter de mettre en place un manomètre 0/4 bars au pied du réservoir au niveau de la conduite de distribution.

Trappe de visite

Un trou réalisé au niveau de la coupole pour pouvoir accéder à la cuve et la réparer en cas de besoin

Echelles ou escaliers

Mis en place pour pouvoir accéder à la cuve du réservoir



Les figures ci-après présentent quelques équipements hydrauliques des réservoirs d'eau potable dans les communes Ambahikily, Ambohimavelona et Saint Augustin



Figure 73 : Conduite de distribution



Figure 74 : Conduite de refoulement



Figure 75 : Vanne de distribution



Figure 76 : Flotteur mécanique



Figure 77: indicateur de niveau d'eau



Figure 78 : Trappe de visite

11.4.2 Etanchéité

Pour empêcher l'entrée d'éléments indésirables dans le réservoir d'eau et de réduire l'effet de l'eau sur la durabilité de l'ouvrage (en particulier pour les eaux corrosives et agressives), il convient d'assurer une étanchéité de l'intérieur (parois et radier) de la cuve par l'application d'un revêtement d'imperméabilisation. Concernant les réservoirs d'eau en béton, l'étanchéité de leur cuve peut également être améliorée par l'ajout d'adjuvants lors du coulage du béton de type résine SIKALITE.

11.4.3 Aération et éclairage

Pour distribuer une eau conforme aux normes de potabilité, il convient veiller à ce que le stockage dans le réservoir ne dégrade pas sa qualité et notamment assurer l'aération et l'éclairage de l'eau, ainsi on évitera le développement des algues.

Pour assurer ces deux fonctions, on met en place des fenêtres au niveau de la partie supérieure des parois de la cuve ou au milieu de la coupole (lanterneau). Dans le cas où l'intervention du personnel sur place n'est pas régulière pour pouvoir ouvrir et fermer les fenêtres, on peut se contenter de mettre des ouvertures lors de la construction du réservoir en plus d'un grillage en métal ou de passoirs pour empêcher l'entrée d'éléments indésirables dans la cuve. Par ailleurs, les réservoirs semi-enterrés ou enterrés présentent l'avantage de bénéficier d'une inertie thermique très satisfaisante, par conséquent, le problème d'éclairage est moins contraignant



Figure 79 : Fenêtres du réservoir d'eau à Ambahikily



Figure 80 : Fenêtres du réservoir d'eau à Ambohimahavelona

11.4.4 Temps de séjour

Le temps de séjour dans un réservoir d'eau est la durée que passe un volume d'eau dans la cuve. Il est égal au rapport du volume de l'eau stockée et du débit de distribution. Pour se placer dans le cas le plus défavorable (temps de séjour le plus important), il faut considérer les périodes de très faibles consommations. Etant donné que le temps de séjour affecte la qualité d'eau et la qualité de la structure de la cuve, il est essentiel de limiter sa valeur de préférence à 3 jours.

Si le réservoir a une capacité de stockage très importante par rapport au volume réellement consommé, il convient de fixer des niveaux de remplissage de cuve moindre pour éviter que l'eau soit stockée pour une grande période et que sa qualité se dégrade davantage

11.4.5 Suivi et entretien

En vue d'augmenter sa durabilité, il est nécessaire d'assurer un suivi et un entretien régulier du réservoir d'eau potable. Cet état des lieux régulier doit permettre de détecter d'éventuelles anomalies au niveau de la structure et du fonctionnement hydraulique. On peut citer les plus fréquentes : fissure, rouille de la trappe de visite et des fenêtres, développement des algues au niveau des fenêtres, fuite au niveau des conduites, etc.

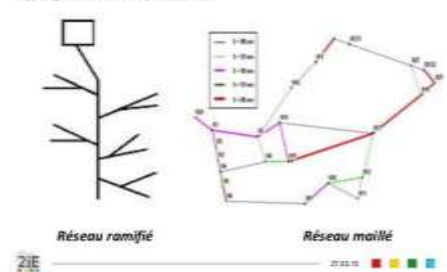
Afin d'éviter la dégradation de la qualité du matériau de la cuve et l'étanchéité de son intérieur, un vidange au moins deux fois par an ainsi un nettoyage au moins une fois par an sont nécessaires. Lors ces deux opérations, on se sert du by-pass pour assurer la distribution de l'eau directement depuis la production après avoir vérifié la fiabilité de la ressource en eau quantitativement et qualitativement.

Le réseau de distribution est la partie du réseau qui permet d'acheminer l'eau vers les points d'eau pour permettre la consommation de la population. Il s'étend de la conduite de sortie de réservoir jusqu'aux points de distribution où les usagers s'approvisionnent en eau potable.

On peut diviser le réseau de distribution en :

01. RESEAUX HYDRAULIQUES

Typologie des réseaux hydrauliques



Après avoir décidé de l'emplacement des points de distribution d'eau en collaboration avec les habitants, il sera temps de faire le tracé du réseau de distribution. Ce dernier est conçu de manière à optimiser les longueurs des tuyaux et en tenant compte de l'occupation actuelle et future du site.

87

Une consultation de l'avis de la commune concernant les lieux d'implantation des conduites doit également être faite afin d'éviter les conflits avec les habitants lors de la pose.

A l'issue de cette phase de l'étude, le bureau d'étude dispose d'un plan provisoire du réseau, des profils en longs du tracé des conduites, coordonnées des ouvrages de charge.

A Ankillioaka, un tracé de réseau a été réalisé à l'issue des études d'APS et d'APD. Par ailleurs, entre le temps de réalisation de ces études et de la réalisation des travaux, la commune a construit une route en gardant quatre attentes pour d'éventuels passages en sous-sol. Par contre, juste avant de commencer les travaux de pose du réseau de distribution, le bureau d'étude s'est rendu compte qu'il n'a pas actualisé ses plans par rapport à ce changement. Un deuxième tracé de réseau a donc été réalisé pour tenir compte la présence de la route.

12.2 Dimensionnement et modélisation

Un premier dimensionnement peut être fait sous Excel en préparant une note de calcul qui fait appel à des formules pour le dimensionnement hydraulique des conduites (Méthode de Darcy-Weisbach, Méthode de Hazen Williams, etc.). Un choix préalable de matériau à utiliser doit être fait pour connaître la rugosité des conduites. L'ensemble des calculs doit permettre de connaître les valeurs de pertes de charges linéaires, les pertes singulières (qui représentent généralement 10% des pertes linéaires) et conclure les charges au niveau de chaque point du réseau. A ce stade, on peut avoir une première valeur de pression et de vitesse présente à chaque nœud.

Ainsi, les résultats trouvés permettent de fournir les diamètres optimaux pour limiter les pertes de charge et un surdimensionnement du réseau. La confrontation de ces résultats avec ce que propose le marché comme diamètres nominaux permet de fixer les valeurs initiales des diamètres des tuyaux du réseau de distribution.

Ensuite, pour vérifier le fonctionnement hydraulique du réseau, une modélisation doit être effectuée sous un logiciel de modélisation des réseaux d'AEP par exemple : Epanet et Porteau.

Le logiciel EPANET est un logiciel qu'on peut télécharger gratuitement sur internet. Il permet de modéliser le fonctionnement du réseau en renseignant les débits et altitudes des différents points d'eau représentés par des nœuds, et les caractéristiques des ouvrages (niveau d'eau dans le réservoir, etc.) et des équipements hydrauliques (courbe caractéristique de la pompe, ..). Une courbe de consommation est également renseignée pour tenir en compte la répartition de la consommation selon les tranches horaires.

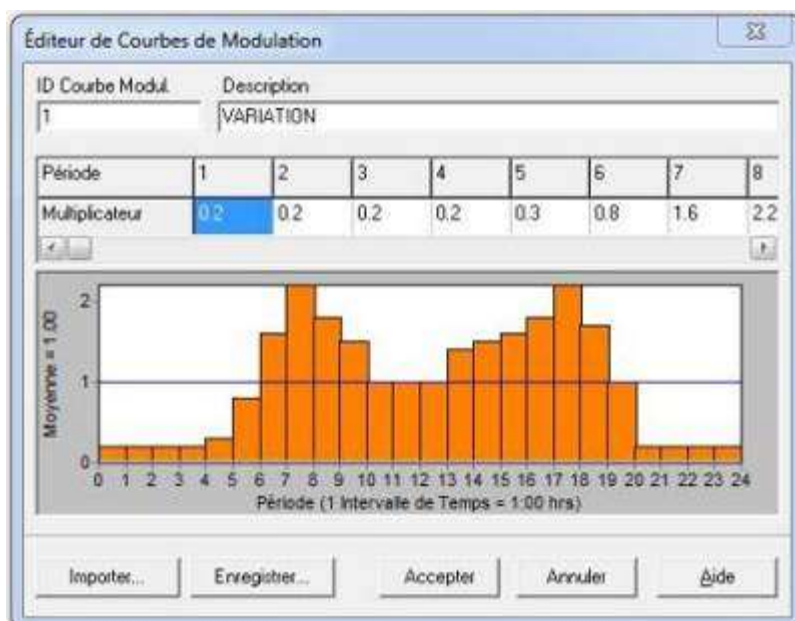


Figure 81 : Exemple de modulation de la consommation horaire

Concernant les canalisations, représentées par des tronçons, il faut renseigner le coefficient de rugosité, qui lui dépend du matériau utilisé.

Matériau	Coefficient de rugosité
PVC	0,0015
Acier	
Acier galvanisé	0,15
Béton	1
Fonte	0,25 à 0,8

Les diamètres adoptés peuvent être modifiés de manière à répondre aux conditions initialement mises par le bureau d'étude et qui sont essentielles pour le bon fonctionnement du réseau.

La modélisation est faite avec le débit moyen et le débit de pointe pour se placer à la fois dans le cas de fonctionnement normal et le cas le plus défavorable. Le coefficient de pointe est estimé, en général, à 1,44 en absence de données sur la consommation réelle de la population.

Pour assurer un service continu et de bonne qualité aux usagers, il faut respecter les conditions de pression au niveau des nœuds et de vitesse de l'eau dans les conduites. Pour éviter la surpression qui peut avoir lieu en particulier au niveau des points à proximité du château d'eau, on fait augmenter les diamètres des canalisations en amont.


	Avantages	Inconvénients	Plage de diamètre	Illustration
PEHD ¹²	Mise en place facile Bonne capacité d'isolation thermique Risque de fragilité en cas de gel réduit (coefficient de conductivité 0,36 kcal/m) Coût d'installation moins cher Très peu de dépôts Bonne résistance à la corrosion Flexibilité importante Légèreté de la pose Bonne performance hydraulique (rugosité faible) Résistance aux coups de bélier ¹³ Adapté au relief accidenté et sur une longue distance	Coût élevé Résistance à la température limitée Propagation de fissures rapide Coefficient de dilation important (0,2) Nécessite des compétences techniques pour la réalisation des accords La perméation ¹⁴	DN 20 à 110 mm	
PVC ¹⁵	Coût moins élevé Capacité à supporter de pression importante Bonne résistance à la corrosion Flexibilité Raccords faciles Existe en pression élevée jusqu'à 25 bars	Risque de fuite au niveau des joints Nécessite d'utilisation de plusieurs joints Risque de cassure élevé Dégradation à la lumière et au gel Sensibilité à l'écrasement et au poinçonnement si la conduite n'est pas sous pression en permanence	DN	
Fonte	Résistance mécanique importante Durée de vie importante Inoxydable Résistance à la corrosion Bonne étanchéité	Nécessité d'un remblai soigné Nombre de joints important Sensible à la corrosion		
Acier	Bonne étanchéité Nombre de joints réduit	Risque de rouille si pas de protection		
Galva	Résistance à la corrosion grâce au zinc			

¹² Polyéthylène à haute densité

¹³ Phénomène dû à une surpression due à une ouverture ou fermeture brusque d'une vanne

¹⁴ Pénétration d'un liquide, gaz ou vapeur à l'intérieur de la conduite

¹⁵ Polychlorure de vinyle

Béton	Bonne résistance mécanique	Coût élevé Pour des grands débits		
-------	----------------------------	--------------------------------------	--	---

En général, on choisit d'utiliser le PVC pour les conduites grands diamètres (diamètres supérieurs à 90 mm), tandis que pour le reste du réseau (Diamètres 20 à 75 mm), le PEHD est préconisé. Pour les passages de la route et hors sol, on utilise une tuyauterie de type galva afin de la protéger d'éventuels actes de vandalisme et crues.

12.4 Accessoires

Le bon fonctionnement du réseau de distribution requiert l'installation d'un minimum d'accessoires. Les travaux topographiques déjà effectués permettent de connaître leur emplacement sur le réseau.

- Filtre ou tamis : Pour éviter d'avoir des bestioles (moustiques, mouches, etc.) dans l'eau distribuée, il est conseillé d'installer un filtre ou un tamis à l'entrée de la conduite de distribution
- Vannes : Deux types de vannes sont mis en place
- *Vannes de vidange* : grâce à lesquels le réseau peut être vidangé en cas de présence d'impuretés ou pour assurer le nettoyage régulier du réseau,
- *Vannes de sectionnement* : à chaque jonction importante, pour pouvoir isoler des conduites en cas d'intervention sur le réseau
- Compteurs : Installés au niveau de plusieurs points du réseau, selon le besoin, pour relever la quantité d'eau y passant.
- Tés : Ils permettent le raccordement au réseau avec une prise depuis un tuyau du réseau d'eau.
- Ventouse : C'est un appareil hydraulique placé au niveau des points les plus hauts du réseau. Parfois, en absence de points hauts dans le réseau, il est conseillé de créer des points hauts artificiels,
- Joints : Mis en place pour assurer l'étanchéité des tuyaux.
- Raccords : Dispositifs pour raccorder les conduites
- Regards : Des regards sont mis en place au niveau des vannes de sectionnements pour permettre la protection de ces vannes et pouvoir y accéder facilement.

Les principaux fournisseurs à Madagascar sont PLASCOM et SMTF.

12.5 La pose des conduites

Ayant à sa disposition les caractéristiques nécessaires de la tuyauterie du réseau, l'entreprise de travaux s'approvisionne en conduites en se référant exactement aux résultats de la partie hydraulique du bureau d'étude. Comme déjà énoncé, l'entreprise de travaux doit préalablement réaliser des relevés topographiques pour vérifier l'exactitude de ceux effectués par la maîtrise d'œuvre.

Les conduites d'eau potable peuvent être installées en tranchée ou aérien. Pour une question de sécurité, il est préférable de les installer en tranchées. Le remblaiement des tranchées du réseau ne doit se faire qu'après validation de l'étanchéité des tronçons.

Lors des travaux de pose des tuyaux, le chef d'équipe doit veiller à s'assurer que les ouvriers en charge de la pose respectent les consignes de l'APD. Pour éviter d'éventuelles fuites lors du fonctionnement du réseau, les conduites doivent être posées de façon rectiligne, et en cas de changement d'orientation, mettre en place des coudes. De plus, il faut s'assurer que les raccords entre les conduites sont bien réalisés.

Pour protéger les canalisations, il est souvent souhaitable de mettre en place des sacs dans les tranchées. Le tuyau doit toujours dépasser le joint torique pour que le travail hydraulique se réalise correctement. Une fois le tuyau bien installé, il faut serrer fortement l'écrou extérieur pour obtenir un rendement maximal du travail hydraulique et mécanique du raccord.

Il est fortement conseillé de ne pas aménager les regards avec du béton en dessous des équipements mais plutôt garder de la terre naturelle. Il faut aussi penser à laisser un espace suffisant dans le regard, pour les opérations d'entretien et de maintenance. La fermeture des regards est souvent assurée par trappe métallique ou béton et le système de sécurisation par fer plat avec cadenas.

12.6 Nettoyage du réseau de distribution

Dans tous les cas, lors de la première mise en service d'un réseau d'AEP, il est préconisé de procéder à un rinçage et une chloration choc pour nettoyer tout le réseau, c'est-à-dire la diffusion dans le réseau d'une eau à forte concentration de chlore (la teneur en chlore actif doit être de 100 ppm soit 100g par m³ de capacité du réseau), sous forme d'hypochlorite de calcium ou hypochlorite de sodium durant 24 heures environ. Puis on fait la vidange du réseau à partir des organes prévus à cet effet.

PROCEDURE DE DESINFECTION PREALABLE DES RESEAUX D'EAU

Choix du désinfectant :

- Le Chlore, la teneur en chlore actif doit être de 100 ppm soit 100g par m³ de capacité du réseau. La javel peut-être éventuellement associée à du permanganate de potassium qui servira de traceur du fait de sa coloration.
- Le permanganate de potassium seul a une concentration de 150 ppm.

Le rinçage préliminaire

Un nettoyage efficace du réseau est la clé d'une bonne désinfection. C'est pourquoi les tuyauteries doivent être rincées énergiquement pendant 2 h en prenant soin d'ouvrir tous les robinets. Pression répétée au moins 5 fois sur les robinets poussoirs (si possible à ouvrir simultanément sur une même antenne).

Le volume d'eau de rinçage doit être de 5 à 10 fois la contenance de l'installation.

Les réservoirs et les ballons doivent subir plusieurs fois successives, un remplissage et une vidange par le point bas.

Préparation et injection de la solution désinfectante

La solution est dosée préalablement dans un bac.

Le volume de solution mère à préparer doit représenter 1/10 de la capacité totale de l'installation ce qui représente pour la javel, 1 berlingot de 60 cm³ du commerce pour 10 litres d'eau et pour le permanganate de potassium 1,5 g pour 10 litres d'eau chaude à 40/ 45°C (la température facilite l'homogénéisation).

Injection de la solution mère

Le réseau à désinfecter doit être rempli lentement d'eau claire afin d'éviter de former des poches d'air.

Il convient d'ouvrir modérément les robinets situés au bout des antennes. Le débit d'eau circulant dans l'installation sera estimé à partir des indications du compteur.

La solution désinfectante est injectée régulièrement à l'aide d'une pompe d'injection depuis un point situé en aval du clapet disconnecteur. Le débit de la pompe doit être réglé en fonction du débit estimé précédemment afin que le 1/10 ème de solution mère s'accompagne de 9/10ème d'eau claire.

Ne pas injecter trop rapidement.

Ne pas introduire en une seule fois la totalité de la solution mère pour ensuite la chasser avec l'eau claire ce qui compromettrait la désinfection.

Veiller à ce que l'injection de la solution désinfectante se fasse durant tout le remplissage de l'installation.

Chaque robinet est ensuite ouvert en commençant par les plus proches du point d'injection jusqu'à l'apparition de la couleur violacée du désinfectant et est refermé aussitôt (d'où l'intérêt d'utiliser un peu de permanganate comme marqueur lorsque le chlore est choisi comme désinfectant).

Dès que la solution apparaît au point le plus éloigné l'ensemble du réseau est isolé et laissé en contact 48h avec le désinfectant.

Le rinçage terminal

Un rinçage énergétique de 2 heures est suivi d'un rinçage à débit suffisant de 24 heures, tous les robinets restant ouverts afin d'éliminer toute trace de désinfectant.

12.7 Mise en service du réseau de distribution

La mise en service du réseau d'eau se fait après la réception provisoire, c'est-à-dire quand tous les ouvrages du réseau sont déclarés fonctionnels. Cette mise en service s'accompagne de la formation du ou des gestionnaires, sur les aspects techniques, financiers et administratifs.

Suite à la mise en service, un système de suivi de la gestion doit être mis en place par le maître d'ouvrage ou les instances publiques en charge de la régulation.

Pour évaluer la performance du réseau d'AEP mis en service, il convient de vérifier les paramètres de performance suivants :

- **Rendement technique** : égal au volume l'eau pompée divisé par l'eau distribuée
- **Rendement global** : égal au volume d'eau pompée divisé par l'eau payé
- **Indice linéaire de pertes (ILP)** : Donne une idée sur la répartition du volume de fuites journalier par unité de longueur. Il est calculé comme suit :

$$ILP = \frac{\text{Volume journalier pompé} - \text{Volume journalier distribué}}{\text{Longueur totale du réseau}}$$

La valeur seuil de l'ILP est 0,01 m³/km/j

12.7.1 Points d'attention

12.7.1.1 Cassure des canalisations et fuites

Des cassures peuvent avoir lieu en particulier lorsque les conduites sont posées sur un relief de forte pente.



Figure 83 : Conduites de distribution et de refoulement à Saint Augustin

Au niveau de la région Atsimo Andrefana, les fuites sont dues essentiellement provoquées par les le non-respect des matériaux exigés dans le cahier de charge et les problèmes de montage et d'installation des canalisations, mauvaises jointures, canalisations enterrée peu profondément, etc. A Saint Augustin, par exemple, une grosse fuite a été engendrée par le non-respect des matériaux exigés par le bureau d'étude et le recours à des mauvais matériaux au moment de la pose des conduites. Ceci a causé une fuite au niveau d'une canalisation passant au-dessous d'une rivière.



Figure 84 : Fuite engendrée à cause du non-respect des matériaux

12.7.1.2 Actes de vandalisme

Le réseau étant une infrastructure nouvelle dans la majorité des communes, des tentatives de vol peuvent avoir lieu pour pouvoir réutiliser les équipements installés au niveau du réseau de distribution (compteurs, vannes, etc.) ou les revendre.

12.7.1.3 Exposition des conduites aux risques naturels

Ceci concerne essentiellement des crues, des débordements de rivières, etc.



Figure 85 : risque de crues à Saint Augustin

Les conduites hors sol sont les conduites les plus exposées aux rayons de soleil, de précipitations et au risque d'inondation. Il faut alors mettre en place des dispositifs de protection en construisant par exemple des plots de béton (ceci est aussi une mesure de sécurité contre le vol) et choisir un matériau résistant (dans la majorité des cas de l'acier galvanisé).



Figure 86 : Plot pour protéger une conduite hors sol

13 Points de distribution d'eau

Les points d'eau sont le dernier maillon de la chaîne du réseau d'AEP. C'est ce qui permet de fournir l'eau potable à l'utilisateur.

13.1 Types de points d'eau

Selon le besoin, les points d'eau peuvent se présenter sous deux formes : Branchements privés (BP), Branchement sociaux, Bornes fontaines (BF) ou Kiosques à Eau (KE).

Dans tous les cas, on s'attachera à ce la distance entre le point d'eau et la population ne soit pas excessif, c'est à dire ne dépassant pas 250 mètres.

Ces points doivent être en mesure de distribuer 30 litres par personne et par jour suivant la norme définie à Madagascar.

13.1.1 Borne Fontaine (BF) / Kiosque à Eau (KE)

Il s'agit de points de distribution d'eau publics mis à disposition des habitants de la commune pour s'alimenter en eau potable.

La localisation des kiosques/BF requiert l'accord de la commune concrétisé par l'établissement des procès-verbaux et des contrats de cession de terrain signés par les parties concernées.

L'emplacement des KE/BF joue un rôle très important dans la gestion du service de l'eau. En effet, si le choix de l'emplacement des kiosques n'est pas bien fait, ceci engendre une disparité de service au niveau du réseau d'AEP et par conséquent la fermeture des BF/KE les moins sollicités par les habitants.

Borne Fontaine : La borne fontaine est un lieu ouvert, en général équipé d'un à deux robinets, prévue pour distribuer à l'eau à 250 habitants.



Figure 87 : Exemple de Borne Fontaine (Coopération Grand Lyon- Haute Matsiatra)

Kiosque à Eau : le kiosque à eau se présente sous la forme d'un petit de 3 mètres sur 4, qui permet de desservir environ 1000 habitants avec 2 à 4 robinets. Par rapport à la borne fontaine, il permet de mieux accueillir le gestionnaire, et lui permet de développer une activité annexe qui peut lui permettre de mieux rentabiliser son activité. Il est moins sujet aux dégradations, plus facile à garder et à entretenir.



Figure 88 : Kiosque à Ankililoaka

Au niveau de la région Atsimo Andrefana, le dimensionnement des kiosques/BF repose sur l'hypothèse qu'un débit de 0,27 l/s sera délivré pour limiter au maximum le temps d'attente des usagers (correspondant au remplissage de 50 bidons de 20l en une heure).

Les KE/BF sont gérés par des fontainiers rémunérés au forfait ou au pourcentage. Les fontainiers doivent reverser, chaque jour, au gérant 80% du prix de vente des m³ comptabilisés en entrée du kiosque ou de la borne. Ainsi ils sont responsabilisés sur les pertes engendrées.

Les problèmes de gestion rencontrés sont dus essentiellement à un manque d'entretien. Les équipements mis en place au niveau des kiosques à savoir le compteur, les robinets, les vannes, les arrêts de fenêtres et de porte sont exposés à la cassure en absence d'entretien et de bonne utilisation de la part du fontainier et des usagers.

13.1.2 Branchement Privé (BP) et Branchement Social (BS)

Branchement particulier (BP)

Un BP est constitué d'un branchement à partir de la conduite principale, formé par un Té avec bouchon. Un regard en béton avec couvercle de dimension 30 x 30 x 40 est placé au droit du système. Ci contre, une attente de branchement privé.



- **Branchement partagé ou social (BS)**

Ce type de branchement (ci-contre) est conçu pour usage 4 à 6 foyers en moyennes. Chaque branchement est formé d'un socle de dimension 0.6 x 0.6 m en béton ordinaire et une colonne de tube métallique, comportant un bassin équipé d'un couvercle en grille métallique. L'eau transite jusqu'à la borne par un tuyau en acier galvanisé 20/27 encastré dans la colonne du tube métallique en béton pour aboutir vers un robinet de puisage en laiton. Un robinet vanne précédé d'un compteur d'eau calibre 25 est placé dans un regard en béton avec couvercle qui assure la fermeture du système lors de la détérioration du robinet de puisage.



Le dimensionnement des conduites du branchement tient en compte le nombre d'habitants y sont raccordés. Le débit est estimé à 0,27 l/s. Les branchements sont composés d'une vanne d'arrêt, d'un compteur protégé par une boîte compteur et d'un robinet.

A Ambahikily, Les ménages raccordés au réseau via un BP sont généralement satisfaits et contents. En effet, pouvoir s'approvisionner en eau potable chez soi représente un privilège pour eux. Plusieurs ménages déclarent que leur vie a changé après le raccordement au BP.

14 Mise en gestion par délégation

Comme énoncé dans les premières parties du présent document, la réalisation d'un réseau AEP dans un pays en voie de développement est longue et complexe car elle nécessite à la fois :

- la recherche des fonds,
- la recherche de compétences suffisantes pour assurer la conception et la réalisation de toutes les composantes techniques du réseau,
- l'application des règles du marché public et des normes mises en vigueur,
- le respect des contrats par tous les prestataires,
- la surveillance de toutes les prestations,
- l'appui technique auprès des agents de la DREAH et des prestataires.

Il est important, après les efforts fournis lors de la réalisation du réseau, d'assurer sa continuité et la pérennité de ses installations à long terme. Pour ce faire, le maître d'ouvrage doit mettre en place un système de mise en exploitation/gestion performant.

14.1 Différents types de délégation

L'article 2 du décret 2003 -193 du 04 mars 2003 portant fonctionnement et organisation du service public de l'eau potable et de l'assainissement des eaux usées du code de l'eau malgache définit les trois modes de gestion comme suit :

« **Affermage** : contrat de délégation de service public par lequel le Maître d'ouvrage confie à un tiers le mandat de gérer le service public de l'eau potable ou de l'assainissement à ses frais, risques et périls. Le maître d'ouvrage charge ce tiers de l'exploitation du service, de la maintenance des installations d'eau et de la responsabilité de tout ou partie des investissements de renouvellement. Le tiers assume les risques techniques et commerciaux et l'autorité délégante reste responsable du financement de la majorité des dépenses en capital. »

« **Concession** : contrat de délégation de service public par lequel un Maître d'ouvrage confie à un tiers le mandant de gérer le service public de l'eau potable ou de l'assainissement à ses frais, risques et périls. Le Maître d'ouvrage charge ce tiers de l'exploitation du service, de la maintenance des installations d'eau, des investissements de construction, de renouvellement et d'extension du réseau. »

« **Gérance** : contrat de Délégation de gestion du service public par lequel un Maître d'ouvrage charge un tiers, contre rémunération, de la réalisation des activités techniques et commerciales nécessaires au bon fonctionnement d'un service public d'eau potable ou d'assainissement. Le Maître d'ouvrage conserve tous les risques techniques et commerciaux inhérents à ces activités, y compris la responsabilité et financement des investissements de renouvellement et d'extension du réseau. »

Les principales différences entre ces trois types de gestion sont présentées dans le tableau ci-après.

Aspect	Affermage	Concession	Gérance
Financier	Investissement à la charge du MO Fonctionnement à la charge du fermier Extension et renouvellement à la charge du MO Maintenance à la charge du fermier Tarif proposé par le fermier, validé par le MO Assujetti au paiement des impôts, taxes, surtaxes et redevances Pertes et bénéfices assumées par le fermier	Investissement à la charge du concessionnaire Fonctionnement à la charge du concessionnaire Extension et renouvellement à la charge du concessionnaire Tarif proposé par le concessionnaire Assujetti au paiement des impôts, taxes, surtaxes et redevances Pertes et bénéfices pour le concessionnaire	Investissement à la charge du MO Fonctionnement à la charge du MO Extension et renouvellement à la charge du MO Tarif proposé par le Maître d'Ouvrage Gérant non assujetti mais Maître d'ouvrage assujetti au paiement des taxes, surtaxes et redevances Pertes et bénéfices pour le Maître d'Ouvrage
Organisationnel	Contrat de délégation, administration assurée par le fermier	Contrat de concession, administration assurée par le concessionnaire	Contrat de service Administration assurée par le MO

Le ministère de l'eau malgache encourage la délégation de la gestion et l'exploitation du réseau d'AEP en affermage à une personne morale ou physique car elle nécessite une bonne maîtrise des compétences techniques et de gestion et le respect des textes réglementaires que les communes et les associations des usagers ne sont pas encore aptes à assurer. Les contrats de délégation par affermage actuels au niveau de la région ont une durée de six ans.

14.2 Contrat de délégation

Avant de confier la gestion d'un réseau d'AEP à un tiers, le MO veille à sélectionner, par appel d'offres, le candidat qualifié susceptible d'être performant et disposant d'une stratégie prévisionnelle sur tous les plans.

14.2.1 Rôle du délégataire et de son personnel

Après la signature du contrat à un délégataire, ce dernier ainsi que son personnel sont dans l'obligation de bien s'organiser pour assurer la gestion et le suivi du réseau d'AEP sous leur charge. Ils doivent anticiper toutes les actions nécessaires pour fournir aux habitants de la commune un service continu.

L'organisation spatio-temporelle des ressources humaines mises en place par le délégataire ainsi la définition de leurs rôles constitue une des principales composantes d'une bonne gestion. Au moins trois personnes doivent être présentes en permanence au niveau du site assurant chacun son rôle comme cité dessous :

Personnel	Rôles
Gérant	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Représenter le Délégataire, ✓ Assurer la pérennité de l'accès en eau potable de toute la population ✓ Coordonner et superviser toutes les activités ; ✓ Elaborer les factures des abonnés ; ✓ Recouvrer les recettes auprès des fontainiers et des abonnés ; ✓ Encaisser les recettes provenant des branchements particuliers et des kiosques à eau ; ✓ Elaborer les différents rapports ; ✓ Gérer les différentes ressources (financières, humaines, etc.) ; ✓ Entretenir la relation avec les autorités locales ; ✓ Sensibiliser la population et partager les informations
Technicien	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Assurer l'entretien et la maintenance des équipements et des installations ; ✓ Assurer le traitement (s'il existe) requis pour assurer la potabilisation de l'eau ; ✓ Effectuer les relevés des indications des compteurs et distributions de factures, ✓ Réaliser les travaux de plomberie, ✓ Vérifier et nettoyer les compteurs du réseau, ✓ Réaliser les branchements particuliers
Gardien	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Assurer la sécurisation et la surveillance des ouvrages

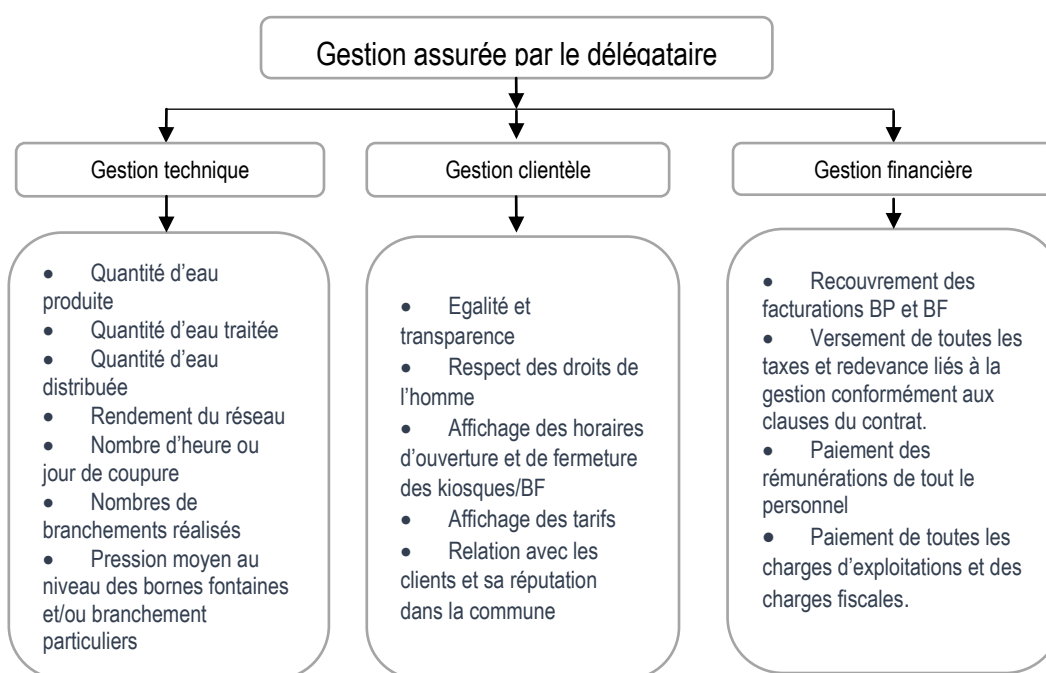


Figure 89 : Eléments de gestion du délégataire

14.2.2 Entretien et maintenance

Puisque le délégataire gère le réseau pendant une longue durée, il est pertinent qu'il ait une approche pour améliorer la performance du réseau en assurant des entretiens et maintenances réguliers, en adoptant une stratégie et un projet d'extension du réseau, et en définissant une politique de renouvellement des ouvrages et équipements hydrauliques. Ceci permettra ainsi d'assurer la pérennité du service de l'eau et sa prestation de délégataire.

14.2.3 Politique de sensibilisation et d'information

Dans le cas de réalisation d'un nouveau réseau, les habitants des communes n'ont souvent jamais eu l'occasion de s'approvisionner en eau potable à partir d'un réseau. Dans ce contexte, le délégataire est appelé à instaurer une politique de sensibilisation et d'information auprès de la population pour leur expliquer les principes de fonctionnement du nouveau réseau et sensibiliser les habitants à l'importance d'utiliser l'eau du réseau.

14.2.4 Egalité et transparence

La question d'égalité entre les habitants au sein commune est très accentuée dans un contexte malgache, en particulier en milieu rural. Le MO doit veiller à vérifier que le délégataire affiche les informations nécessaires pour assurer le service de l'eau (prix de vente, horaires d'ouverture et fermeture des BF et du bureau du fermier, coût et durée d'un BP, analyses d'eau effectuées, avis de coupure d'eau, etc).

En outre, dans une optique de transparence et égalité des services assurés pour les habitants, le délégataire est dans l'obligation d'ouvrir un bureau local accessible au public dans la localité affermée (pour toute éventuelle doléance et demande d'information relative à la gestion) et d'afficher les horaires d'ouverture et de fermeture des BF/kiosques ainsi les prix de vente de l'eau.

14.2.5 Economie du délégataire

Le délégataire est rémunéré à partir du chiffre d'affaires qu'il collecte à partir de la vente d'eau (Recettes) moins les différentes dépenses payées (Charges). Ainsi, le délégataire cherche à minimiser ses dépenses et augmenter les bénéfices.

Afin de réduire le montant des charges, et optimiser le rendement du réseau (quantité d'eau produite / quantité d'eau facturée), le délégataire est amené à entretenir régulièrement les installations du réseau et d'anticiper la résolution des différents problèmes qui peuvent apparaître lors de la mise en service du réseau. Par ailleurs, le délégataire doit avoir un stock de matériaux et un minimum d'équipements pour faire face aux problèmes de cassure des installations et accessoires hydrauliques sur site et pour installer les branchements privés sous la demande des ménages. L'évolution des bénéfices est aussi fonction du volume vendu et du taux de recouvrement auprès des BF/kiosques et des BP (quantité d'eau payée / quantité d'eau facturée)

Le délégataire est appelé alors à assurer un suivi financier régulier auprès des fontainiers et à augmenter le nombre de branchements privés.

14.2.6 Rôle du délégant (commune)

De son côté, la commune doit inciter les habitants à former une association pour représenter l'ensemble des usagers lors des réunions avec les autres parties du projet et exprimer ainsi leur avis par rapport au service de l'eau. Elle est appelée aussi à aider le délégataire pour l'amélioration de son service (proposer les fontainiers, assurer certains services ou produits selon sa capacité, etc)

Dans la région Atsimo Andrefana, la DREAH organise des réunions régulières avec les maires et les délégataires pour faire le point sur la gestion des systèmes, étudier les problèmes rencontrés pour chercher ensemble les solutions adéquates.



Figure 90 : Réunion entre DREAH, maires et délégataires le 13/04/2018

15 Conclusion

Ce rapport expose les étapes nécessaires à la construction et à la mise en service d'un réseau d'eau potable, dans le cadre des activités de l'DREAH Atsimo Andrefana avec l'appui d'Experts-Solidaires. Il a été possible grâce à la patience d'Amandine Gilbert, Assistante technique Junior d'Experts-Solidaires, Rolland Rébère et toute l'équipe de la DREAH d'Atsimo Andrefana, l'appui technique et la relecture de Gilian Cadic, Jean Xueref et Jean-Pierre Mahé. Qu'ils en soient ici remerciés. (Tous les documents mentionnés dans ce rapport sont disponibles auprès d'Experts-Solidaires ou de la DREAH d'Atsimo Andrefana)