

III-3 LA NAPPE CALCAIRE

III-3-1 Caractéristiques de l'aquifère

Le calcaire est une roche sédimentaire à réseau de fracture avancé, propice à la circulation d'une énorme quantité d'eau. Cette karstification de la roche lui donne un potentiel aquifère important, favorable à l'exploitation. Cependant, cet aquifère est encore à peine exploité à cause de la complexité de son accès.

La formation calcaire est rencontrée sur une superficie de 6198 km², dans toute la région. Son épaisseur est estimée à 80m en moyenne.

i- Porosité efficace

Pour l'étude de l'aquifère karstique, la porosité efficace est un paramètre passif. En effet, l'aquifère est étudié à l'échelle des fractures pour les cas.

Donnons quand même, à titre indicatif, une valeur de la porosité efficace pour les roches calcaires

$$2\% \leq n_e \leq 10\% \text{ (d'après G.Castany)}$$

ii- Transmissivité et coefficient d'emmagasinement

Les données de base utilisées pour la détermination de ces deux paramètres sont les résultats d'essai de pompage à débit constant de 180 m³/h au point de forage TPW1. Les mesures de rabattement ont été effectuées sur quelques piézomètres du site.

Selon que la durée du pompage soit courte ou longue, on a utilisé respectivement les méthodes d'interprétation bi-logarithmique de Theis et la méthode d'approximation semi-logarithmique de Jacob. Les résultats obtenus à chaque point de mesure sont les suivants :

Point de mesure	$T [m^2/s]$	S
296	$6,67.10^{-3}$	$5,85.10^{-4}$
737	$1,09.10^{-3}$	$4,93.10^{-4}$
515	$2,03.10^{-3}$	$1,42.10^{-4}$
397-630	$1,25.10^{-3}$	$1,64.10^{-4}$
433-709	$3,9.10^{-3}$	$2,38.10^{-4}$
360	$9,95.10^{-3}$	$1,99.10^{-4}$
789	$7,96.10^{-3}$	$1,2.10^{-4}$
850	$9,95.10^{-3}$	$7,96.10^{-5}$

Les courbes ayant servi à la détermination des paramètres T et S sont présentées en annexe 6

Remarque

On a gardé la même méthode semi-logarithmique de Theis-Jacob utilisée précédemment pour la détermination de T et S. certes, il ne s'agit pas ici d'un milieu poreux mais l'aquifère karstique peut être considéré comme un milieu continu réel équivalent. Le milieu est considéré à une échelle largement supérieure à la discontinuité.

iii- Conductivité hydraulique K

Point de mesure	T [m ² /s]	b [m]	K [m/s]
296	$6,67.10^{-3}$	50	$1,33.10^{-4}$
737	$1,09.10^{-3}$		$2,18.10^{-5}$
515	$2,03.10^{-3}$		$4,06.10^{-5}$
397-630	$1,25.10^{-3}$		$2,5.10^{-5}$
433-709	$3,9.10^{-3}$		$7,8.10^{-5}$
360	$9,95.10^{-3}$		$1,99.10^{-4}$
789	$7,96.10^{-3}$		$1,59.10^{-4}$
850	$9,95.10^{-3}$		$1,99.10^{-4}$

iv- Diffusivité

Point de mesure	T [m ² /s]	S	D [m ² /s]
296	$6,67.10^{-3}$	$5,85.10^{-4}$	11,4
737	$1,09.10^{-3}$	$4,93.10^{-4}$	22,1
515	$2,03.10^{-3}$	$1,42.10^{-4}$	14,3
397-630	$1,25.10^{-3}$	$1,64.10^{-4}$	7,6
433-709	$3,9.10^{-3}$	$2,38.10^{-4}$	16,4
360	$9,95.10^{-3}$	$1,99.10^{-4}$	50,0
789	$7,96.10^{-3}$	$1,2.10^{-4}$	66,3
850	$9,95.10^{-3}$	$7,96.10^{-5}$	125,0

En résumé les caractéristiques moyennes de l'aquifère karstique sont les suivantes :

n_e (%)	T[m²/s]	S	K[m/s]	D[m²/s]
2 à 10	$5,35.10^{-3}$	$1,97.10^{-4}$	$1,07.10^{-4}$	

Tableau 23: Caractéristiques de l'aquifère karstique

III-3-2 Etude de la nappe*i- Réserve totale*

La superficie de l'aquifère concerné par le captage mesurée sur ARCGIS à partir de la base de données de géologie de Madagascar est de 478km² et l'épaisseur saturée est de 50m.

A [m ²]	e [m]	S	V _{total} [m ³]
478000000	50	1,97.10 ⁻⁴	2 390 000

ii- Réserve renouvelable

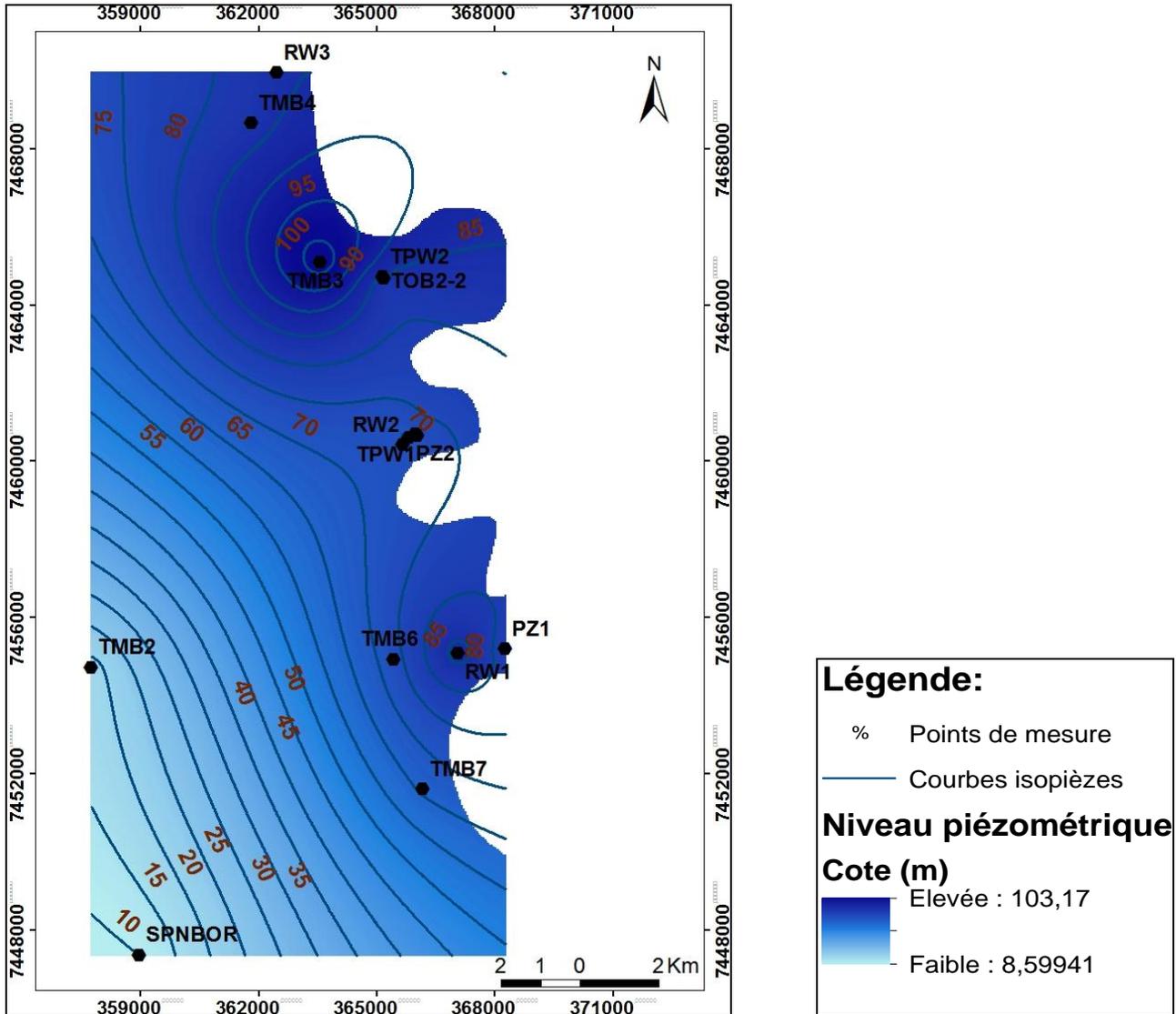
➤ Zone de recharge

La recherche de la zone de recharge de l'aquifère calcaire n'est pas une tâche évidente car en premier lieu, la zone d'affleurement de ce dernier présente un bilan hydrique négatif. De plus, le calcaire est quasi-imperméable à la surface supérieure et l'infiltration verticale est négligeable. Ainsi la recharge ne se fait pas directement à la surface. C'est pour cela qu'on doit passer par l'étude de plusieurs paramètres pour identifier l'aire d'alimentation de la nappe.

Etude des niveaux d'eau : carte isopièze

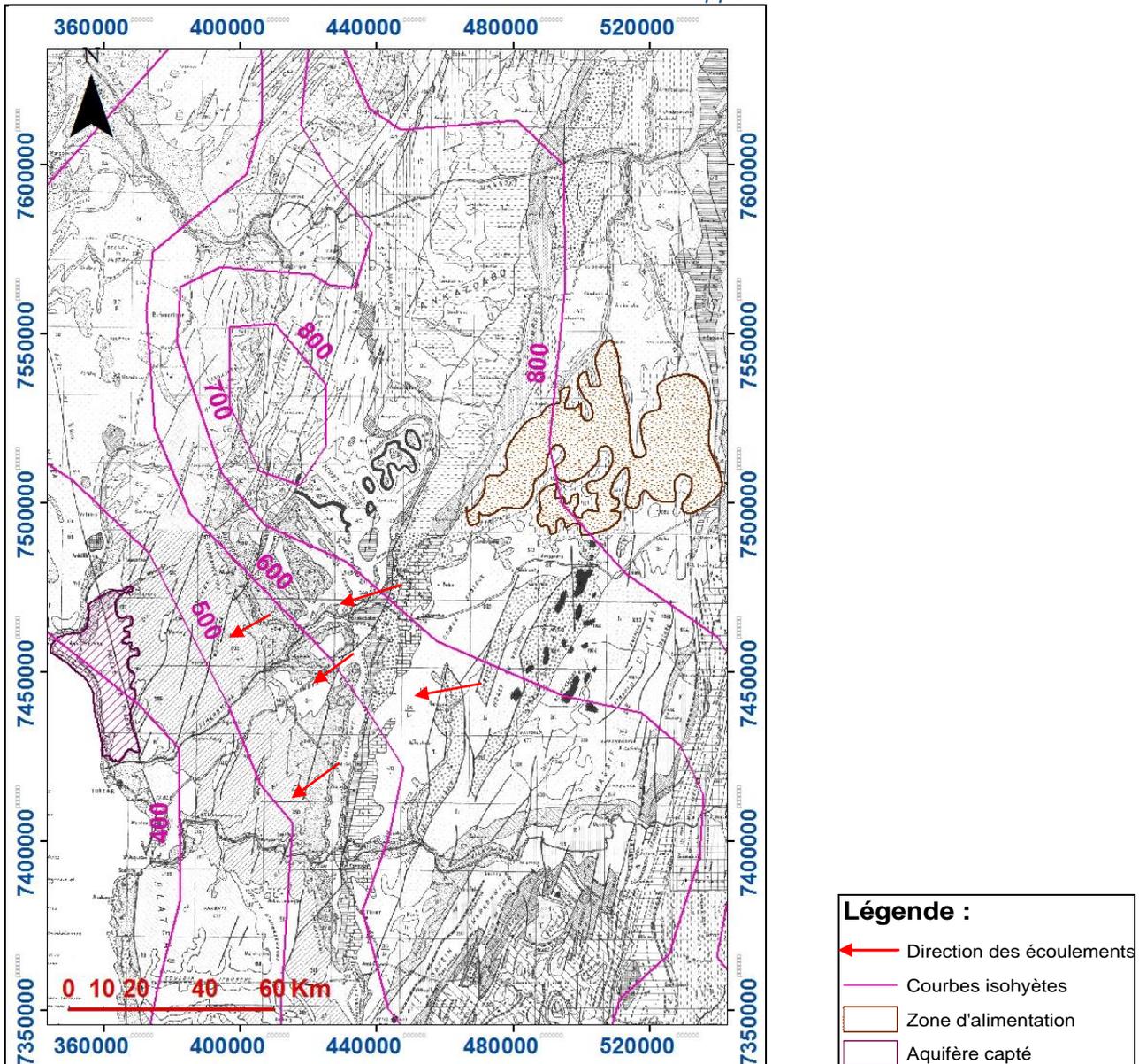
Les niveaux d'eau mesurés à plusieurs points d'observation mis en place par la Société Toliara Sands ont permis d'établir la carte des niveaux piézométriques dans la nappe calcaire.

Carte 8 : Carte des isopièzes de la nappe calcaire



En suivant la direction des écoulements, on peut tirer une première conclusion : la recharge de la nappe se fait du nord-est. Une coupe géologique suivant cette direction s'avère être utile pour identifier la formation géologique susceptible de soutenir l'alimentation.

Carte 9 : Zone d'alimentation de la nappe calcaire



Source : BDEA (Base de données du secteur eau et assainissement)-Ministère de l'eau

Illustration 6 : Coupe géologique E/W de Ranohira au Canal de Mozambique



Source: Géologie de Madagascar-Besairie1 ; (1973)

En s'appuyant sur la coupe géologique ci-dessus, nous pouvons affirmer que l'aquifère alimentant la nappe calcaire est le dôme sableux de l'Isalo. En effet, cette formation sableuse est très perméable et par conséquent favorable à l'infiltration d'une importante quantité d'eau. Cette supposition est d'ailleurs justifiée par un autre paramètre, la pluviométrie. Les isohyètes indiquent une pluviométrie de 800mm au niveau de l'Isalo grés-sableux. Cette quantité de pluie est assez grande et peut générer une infiltration importante pour alimenter la nappe.

➤ Volume de recharge

La pluviométrie considérée pour établir le bilan est celle obtenue à la station de Ranohira.

Bilan hydrologique à Ranohira

Tous les éléments du bilan tels que la pluie, l'ETP et le ruissellement sont calculés respectivement en annexe 2, annexe 4, et annexe 3.

Mois	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	Annuel
P	88	191	234	174	103	27	11	2	3	4	11	48	900
ETP	104	108	104	93	90	76	60	43	42	53	65	93	931
P-ETP	-15	83	130	81	13	-48	-49	-41	-39	-48	-53	-44	
Déficit cumulé	338	254	0	0	0	48	97	138	177	225	278	323	
Stock S	3	86	100	100	100	61	49	27	16	10	6	4	
ΔS	-1	83	0	0	0	-39	-12	-22	-11	-6	-4	-2	-14
ETR	90	108	104	93	90	67	24	24	14	11	15	50	690
Surplus	0	0	130	81	13	0	0	0	0	0	0	0	224
R(mm)	0	0	50	39	13	0	0	0	0	0	0	0	102
I(mm)	0	0	81	41	0	0	0	0	0	0	0	0	122

Tableau 24 : Bilan hydrologique à Ranohira

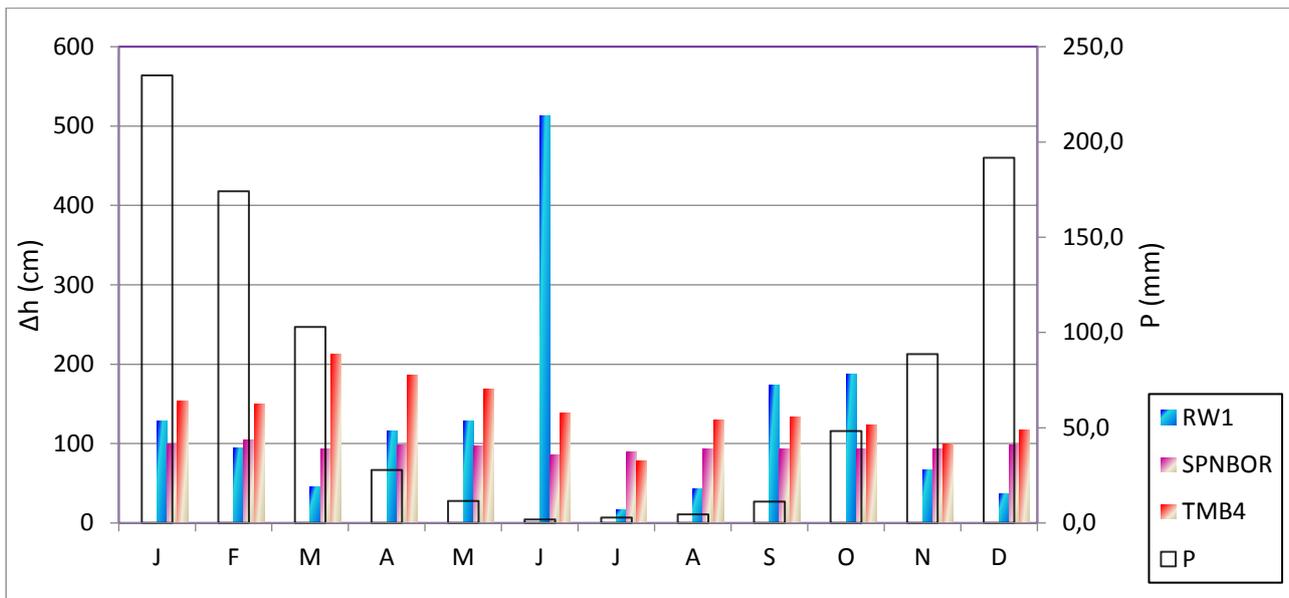
$$P = R + I + ETR \pm \Delta S$$

$$900 = 102 + 122 + 690 - 14$$

I [mm]	A [m ²]	V _{recharge} [m ³]
122	475500000	58 011 000

iii- Etude de la fluctuation des niveaux d'eau

Trois séries de mesure sont reportées sur l'histogramme avec la pluviométrie afin d'analyser la variabilité du niveau d'eau par rapport au régime de pluie dans le temps et dans l'espace.



Graphique 4: Fluctuation des niveaux d'eau dans la nappe calcaire

En observant l'histogramme, on constate qu'au niveau de SPNBOR, près de la côte, la nappe souterraine connaît une variation moindre au cours des saisons. La nappe est insensible au régime de pluie, ce qui suggère une recharge répartie uniformément le long de l'année.

Un peu plus à l'intérieur des terres, la nappe subit une variation de niveau plus considérable, allant jusqu'à 1m durant l'année. Par rapport au régime de pluie, les niveaux d'eau montrent un décalage d'environ 2 mois après la pluie. Ceci s'explique par le fait que la vitesse d'écoulement souterrain est faible et la recharge prend du temps pour transiter vers l'aquifère.

Les niveaux d'eau mesurés plus au nord, dans RW1, présentent une fluctuation assez importante et fréquente le long des saisons. La nappe réagit d'une manière très aléatoire par rapport à la pluie. On associe cela à un phénomène particulier ou à une erreur de mesure lors des observations.

III-4 ETUDE SIMPLE DE L'INTERFACE EAU DOUCE-EAU SALÉE

En région côtière, certains aquifères renfermant de l'eau douce sont en contact avec l'eau salée d'origine marine. Cette dernière, ayant une densité plus élevée que l'eau douce (1,025 kg/L en moyenne pour l'eau salée contre 1 kg/L pour l'eau douce), a tendance à pénétrer à l'intérieur des terres par gravité. Le contact entre ces deux eaux, de propriétés différentes évolue ensuite selon les lois de la diffusion et de l'hydrodynamique, mais également en fonction des hétérogénéités spatiales des propriétés du milieu souterrain, de l'exploitation de l'aquifère et de sa recharge par les précipitations.

L'étude détaillée de l'intrusion saline est une analyse très complexe qui fait l'objet d'une science à part. Dans cette section, on se limitera à une étude très globale et simplifiée du cas, pour avoir une vue générale sur la situation de l'interface eau-douce-eau salée de la zone étudiée. Cette interface eau douce-eau salée se présente comme suit :

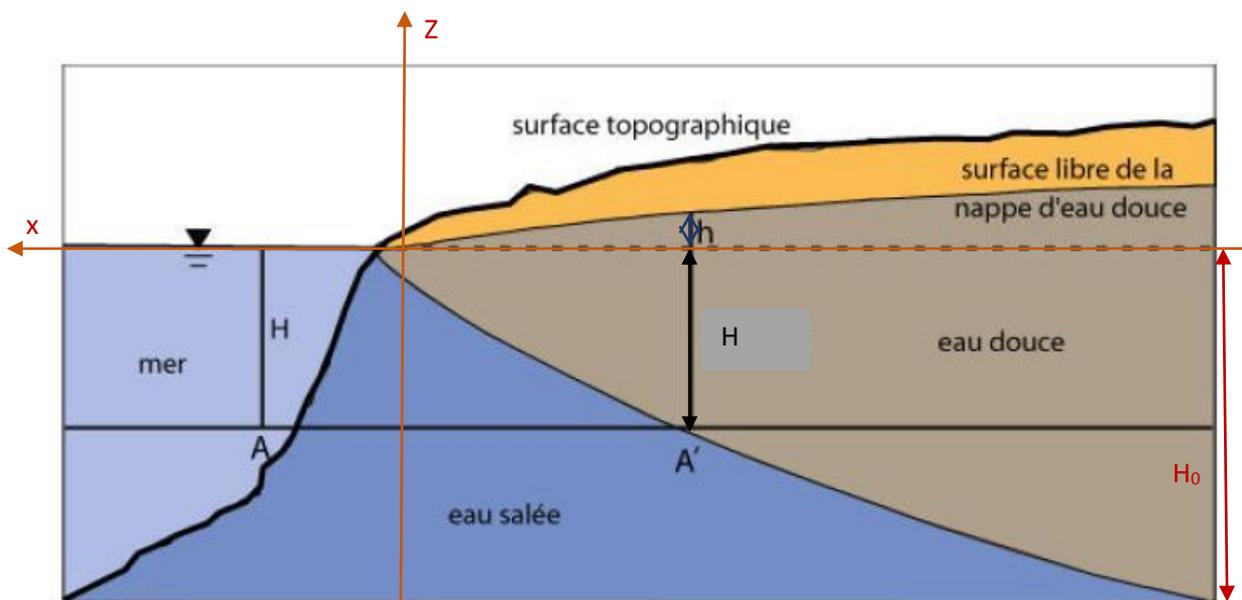


Illustration 7 : Représentation en 2D d'une interface eau douce-eau salée

Différentes solutions analytiques sont disponibles pour représenter l'interface eau douce/eau salée. L'équation de Ghyben-Herzberg, qui est la plus utilisée et la plus simpliste, repose sur l'équation d'équilibre hydrostatique entre l'eau douce et l'eau de mer et sur les hypothèses suivantes :

- les deux fluides ne sont pas miscibles et le contact entre eux est supposé être représenté par une interface nette ;

- les deux fluides sont en équilibre hydrostatique dans un milieu homogène et poreux, dans un aquifère unique.

En régime permanent, le profil caractérisant la profondeur de l'interface eau douce/eau salée est donné par la solution analytique de Ghyben-Herzberg. Elle s'exprime comme suit :

$$H(x) = \sqrt{\frac{2Q}{K} \frac{1}{\varepsilon(1+\varepsilon)}} * \sqrt{(-x)} \quad [V-1]$$

Où $H(x)$: Profondeur de l'interface par rapport à la mer [m]

x : Distance de la côte vers l'intérieur des terres [km]

Q : Débit d'eau douce s'écoulant vers la mer [m³/s]

K : Conductivité hydraulique de la formation aquifère [m/s]

$\varepsilon = (d_s - d_d)/d_d$: Contraste de densité entre eau douce et eau salée

Cette relation n'est valable que pour une valeur de x telle que $-L \leq x \leq 0$.

L est définie comme étant la longueur de pénétration du coin salé dans la nappe. Il s'agit du point de rencontre de l'eau douce-eau salée et du plancher imperméable. En notant H_0 la profondeur du plancher imperméable en mètre, L s'exprime comme suit en [km] :

$$L = \frac{1}{2} \varepsilon(1 + \varepsilon) H_0^2 \frac{K}{Q}$$

En application par rapport à notre étude : en supposant que le plancher imperméable est représenté par le toit de la formation calcaire à 50m de profondeur et le débit de la nappe Q égal à 250m³/j/longueur de côte, on trouve **$L = 3,62\text{km}$** .

En portant cette valeur de L dans l'équation [V-1], on trouve bien $H = 49,98\text{m} \sim 50\text{m}$.

Remarque :

En réalité, l'échange au niveau de l'interface eau douce/eau salée n'est pas toujours en régime permanent car le niveau de la mer varie selon les périodes. Dans ce cas, la relation de Ghyben-Herzberg n'est plus valable que si l'on y introduit le facteur temps qui définit le régime de la mer. Plus exactement donc on devrait avoir $H = H[x(t)]$.

Il en est de même pour le calcul de la longueur de pénétration ; comme L varie en fonction de la profondeur du toit imperméable et cette dernière en fonction du niveau de la mer, alors L varie également en fonction du temps.

CHAPITRE IV :
ETUDE QUALITATIVE DES RESSOURCES EN EAU

Bien qu'elle soit parfois négligée, la qualité de l'eau est un paramètre très pertinent dans une étude de ressource en eau. Après avoir entrevu la situation des ressources en eau en termes de quantité, il est nécessaire d'acquérir des connaissances sur la qualité de ces ressources. Un suivi de la qualité de l'eau a été effectué à plusieurs endroits du site. Ces points de mesures sont représentés sur l'image suivante.

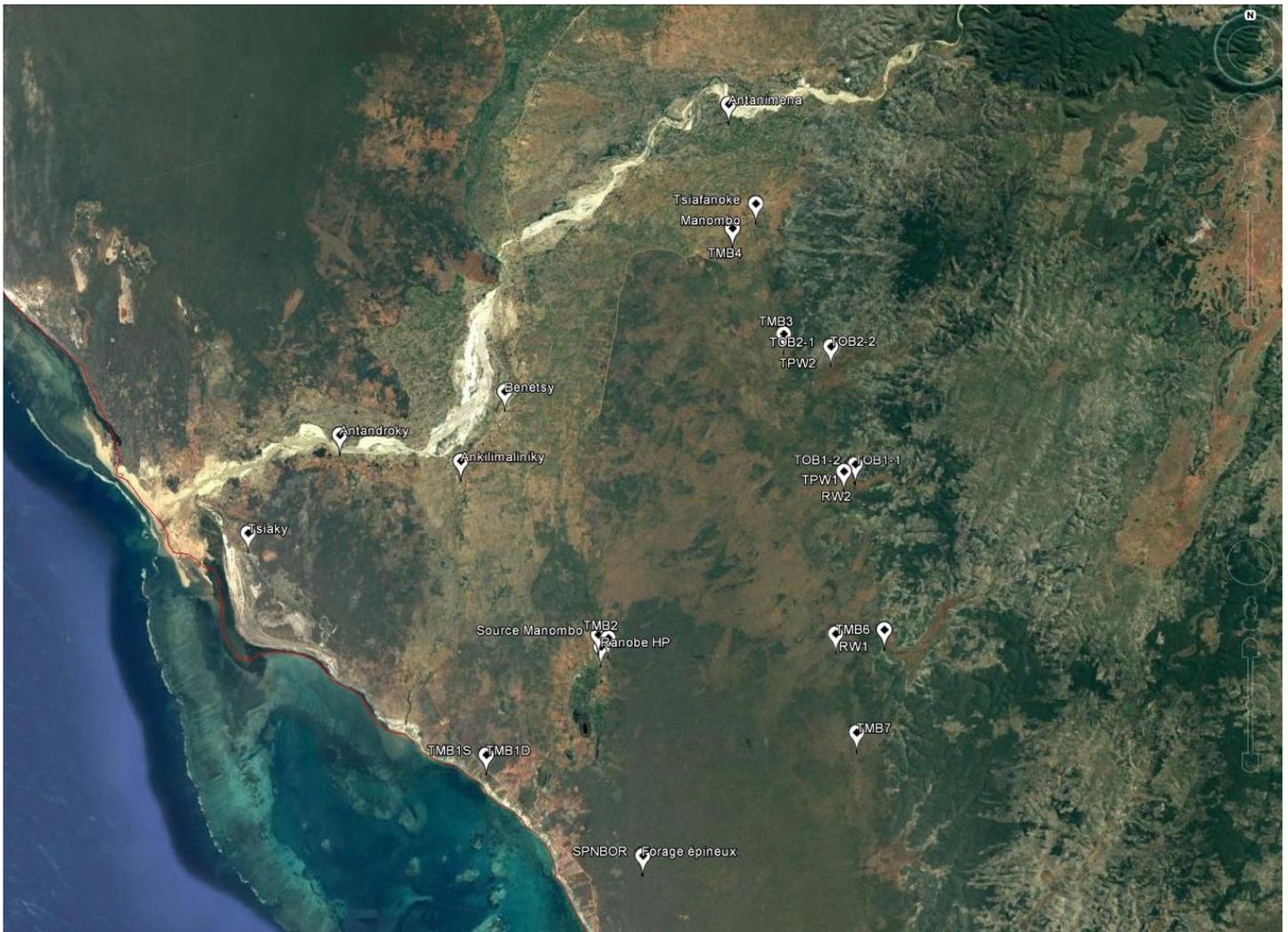


Illustration 8: Emplacement des points de suivi de la qualité de l'eau