

I : GENERALITE SUR LES EAUX SOUTERRAINES

Cette partie traitera les notions sur l'hydrogéologie. Elle donnera les définitions nécessaires concernant l'eau souterraine qui est le domaine de notre étude. Elle évoquera ainsi les facteurs de vulnérabilité de la ressource.

I-1 CYCLE DE L'EAU

Les ressources en eau destinées à la consommation humaine proviennent de l'eau de pluie, des eaux de surface et des eaux souterraines. L'ensemble de ces ressources fait partie d'une dynamique unique représentée par le cycle de l'eau (figure1).

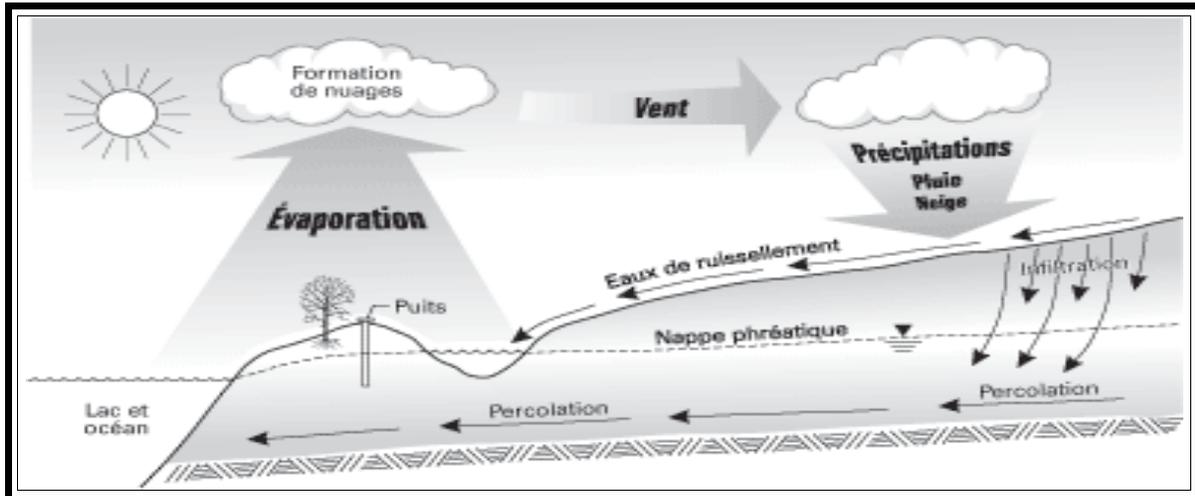


Figure 1: Le cycle naturel de l'eau

Le cycle de l'eau est une série de transformations qui se produisent dans la circulation de l'eau de l'atmosphère vers la surface et dans les régions souterraines, puis de nouveau de la surface vers l'atmosphère. Lorsque les précipitations tombent à la surface du sol, une partie de l'eau ruisselle vers les lacs et les cours d'eau et une partie s'infiltrate dans le sol et percole verticalement dans la zone de saturation (nappe phréatique). Ce processus s'appelle l'alimentation ou recharge, et les endroits où il se produit s'appellent zones d'alimentation ou zone de recharge. Cette séquence peut s'étendre sur des dizaines de kilomètres. C'est tout au long de ce parcours à travers les différentes formations géologiques, appelées aquifères, qu'elle peut être exploitée par des ouvrages de captage pour satisfaire les besoins en eau des utilisateurs [5].

I-2 L' AQUIFERE

C'est une roche capable de contenir et de laisser circuler facilement l'eau.

Les spécialistes des eaux souterraines distinguent généralement deux types d'aquifères en fonction des attributs physiques de ces derniers : *les milieux poreux* et *les aquifères fissurés*[5].

- *Les milieux poreux* sont des aquifères composés d'agrégats de particules distinctes comme le sable et le gravier. L'eau souterraine occupe les vides interstitiels des grains à travers lesquels elle circule. Les milieux poreux où les grains ne sont pas reliés l'un à l'autre sont considérés comme *meubles* (le sable et le gravier). Si les grains sont cimentés les uns aux autres, ces aquifères sont dits *consolidés*. Les grès sont des exemples de milieux poreux consolidés.
- *Les aquifères fissurés* sont des roches dans lesquelles l'eau souterraine circule à travers des joints dans une roche par ailleurs solides. Le granite et le basalte en constituent des exemples. Les calcaires sont souvent des aquifères fissurés dans lesquels les fissures et les fractures peuvent être agrandies par dissolution, formant de grands chenaux ou même des cavernes. Un terrain calcaire où la dissolution a été très active s'appelle le *karst*.

Les milieux poreux, comme le grès, peuvent présenter un degré si élevé de cimentation ou de recristallisation que tous les espaces originaux sont remplis. Dans ce cas, la roche n'est plus un milieu poreux. Toutefois, si elle contient des fissures, elle peut encore assurer la fonction d'un aquifère fissuré. Certains matériaux très poreux ne sont pas perméables. L'argile, par exemple, comporte de nombreux interstices entre ses grains, mais ces vides interstitiels ne sont pas assez grands pour permettre le libre passage de l'eau.

I-3 LA NAPPE D'EAU SOUTERRAINE

C'est l'ensemble de l'eau contenue dans l'aquifère. Elle peut être alimentée généralement par les précipitations, les infiltrations d'eau de surface et l'intercommunication entre les différentes nappes. Elle n'est pas statique mais en mouvement. Dans certains matériaux *perméables* (sable), l'eau souterraine peut se déplacer sur plusieurs mètres en une journée. Par contre elle ne circule que très lentement dans des matériaux relativement imperméables comme l'argile et les schistes.

Le niveau au-dessous duquel tous les interstices sont remplis d'eau s'appelle la *surface de saturation*. Au-dessus de cette surface se trouve la *zone d'aération (insaturation)* où les interstices dans la roche et le sol contiennent à la fois de l'air et de l'eau. L'eau dans cette zone

s'appelle l'*humidité du sol*. Toute la région de l'aquifère au-dessous de la surface de saturation est dénommée *zone de saturation* où l'eau souterraine est exploitable[5].

Le *temps de séjour* de l'eau souterraine, c'est-à-dire la durée pendant laquelle l'eau demeure dans la portion souterraine du cycle de l'eau, varie énormément. L'eau peut demeurer seulement quelques jours ou quelques semaines dans le sous-sol ou jusqu'à 10 000 ans ou plus. Les temps de séjour de dizaines, de centaines ou même de milliers d'années ou plus ne sont pas exceptionnels. A titre de comparatif, le temps de renouvellement de l'eau de rivières, ou le temps que met l'eau de rivières à se remplacer complètement, est d'environ deux semaines[5].

I-3-1 La nappe phréatique

La nappe phréatique ou nappe superficielle est celle qui se forme près de la surface au-dessus de la première couche imperméable. Son niveau dit hydrostatique correspond au niveau de l'eau dans le puits. Il n'est pas horizontal mais ses divers points se placent sur une surface dite piezométrique, sensiblement parallèle à la surface du sol.

Les dunes des zones côtières renferment des nappes phréatiques de type spécial, où les eaux douces d'infiltration reposent par différence de densité sur une nappe salée en liaison avec le niveau des mers. Un puisage intensif peut occasionner un mélange avec les eaux salées [6].

I-3-2 Les puits

Le puits est un ouvrage généralement creusé manuellement, qui capte la nappe. La profondeur et son diamètre varient en fonction du contexte. Certains ouvrages sont maçonnés de pierre ou en briques. Ils sont rarement protégés (trou nu au sol) des pollutions venant de la surface.

C'est l'eau souterraine qui alimente les puits. Quand on creuse un puits, ce sont les nappes phréatiques que l'on rencontre [7].

Un puits protégé contient les parties suivantes : l'aménagement de surface, le cuvelage, le système ou moyen d'exhaure.

- ***l'aménagement de surface :***

C'est une partie essentielle du puits, en terme de qualité de l'eau. Elle protège contre les infiltrations d'eaux de surface. Au moins deux éléments doivent y exister :

–La margelle qui est un muret autour de la tête du puits. Elle limite les risques de chute et l'accès des animaux aux abords,

–Le trottoir et le drainage sont faits pour drainer les eaux de surfaces vers l’extérieur et pour éviter l’infiltration des eaux de surface.

- ***le cuvelage :***

Il a pour fonction de soutenir le terrain traversé et d’empêcher aussi l’infiltration d’eau de surface. Le cuvelage peut être en béton, brique ou en coffrage métallique.

- ***le système ou moyen d’exhaure :***

C’est le moyen pour le puisage de l’eau de puits à savoir : une puisette, une poulie, un treuil ou même une pompe à main.

I-4 LA VULNERABILITE DE LA NAPPE D’EAU SOUTERRAINE

L’eau souterraine n’est pas, en général, à l’abri des pollutions malgré l’idée de pureté naturelle qui leur est communément attachée.

Définitions de la vulnérabilité :

1. La vulnérabilité est la sensibilité de la nappe face à des pollutions émises à partir de la surface du sol [8].
2. C’est le défaut de protection ou de défense naturelle de l’eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales [9].

I-4-1 La protection naturelle des eaux souterraines [8] :

Les eaux souterraines peuvent être protégées naturellement selon les conditions suivantes :

- L’état et les caractéristiques physiques et chimiques du sol : par exemple un sol imperméable constituera une protection primaire à la diffusion verticale des polluants, la porosité de la zone non saturée peut permettre une adsorption des polluants.
- La profondeur de la nappe : une nappe profonde augmente le temps de séjour du contaminant.
- Le renouvellement de l’eau : un renouvellement important favorise l’épuration et la dilution des pollutions.
- La position du captage : un captage situé en amont des sources de pollution prévient les contaminations.
- La maîtrise des activités polluantes : les activités polluantes en dehors d’un périmètre de protection évitent les contaminations.

I-4-2 Les sources de contamination de l'eau souterraine

Elles peuvent être ponctuelles ou diffuses [5]

Les sources de contamination ponctuelles :

- Les systèmes septiques sur place comprenant les bactéries, les virus, les détersifs et les produits de nettoyage ménagers,
- Les fuites de réservoirs ou de pipelines contenant des produits pétroliers,
- Les pertes ou déversements de produits chimiques industriels aux installations de fabrication,
- Les puits d'injection souterrains (déchets industriels),
- Les décharges municipales,
- Les déchets d'élevage du bétail,
- Les fuites de réseau d'égouts,
- Les produits chimiques utilisés dans les installations de préservation du bois,
- Les résidus de zones minières,
- Les cimetières,
- Les puits pour l'élimination des déchets liquides,
- Les déversements liés aux accidents routiers ou ferroviaires.

Les sources de contamination diffuses :

- Les engrais sur les terres agricoles,
- Les pesticides sur les terres agricoles et les forêts
- Les contaminants dans les retombées sous forme de précipitations, de neige et de dépôts atmosphériques secs.

I-5 LES TRANSFERTS DE CONTAMINANTS DANS LES EAUX SOUTERRAINES

I-5-1 Transfert des contaminants chimiques

Le transfert peut se faire par deux voies : par l'entrée d'eaux de surface et par le sol [7].

- *L'entrée d'eaux de surface :*

Le transfert nécessite l'existence de voies d'infiltration jusqu'à la nappe (les galeries creuses par des vers, les fentes de sécheresse, les terrains fissurés et karstiques, les sol perméables, etc).

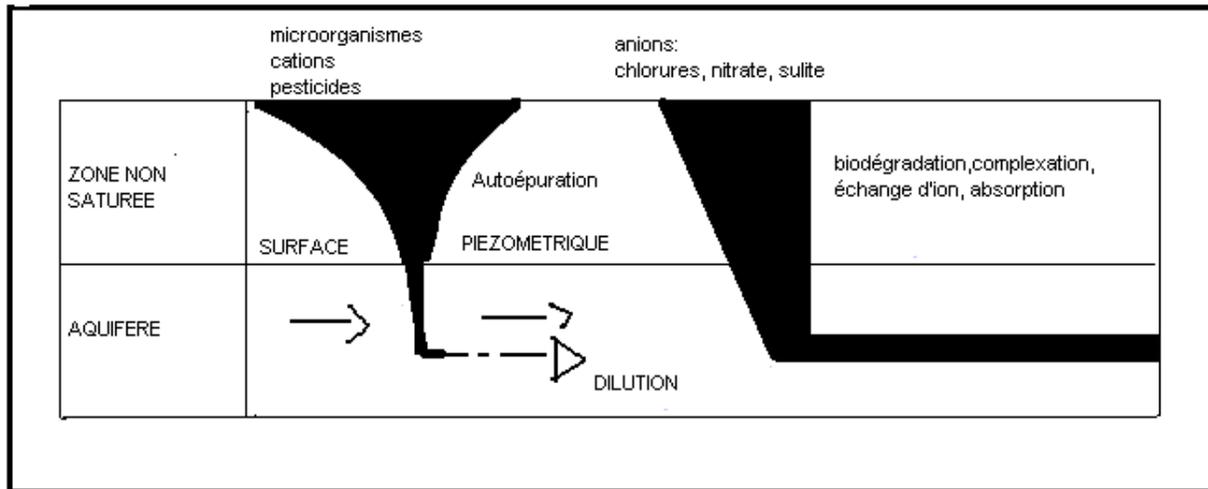
- *Le sol*

Ce transfert est conditionné par la nature du sol et la capacité de migration des polluants.

Le type de sol conditionne la vitesse des liquides qui s'infiltrent à partir des fosses et des tranchées de drainage. Les argiles qui gonflent à l'humidité peuvent devenir imperméables. D'autres sols, comme les limons et les sables fins, peuvent être perméables à l'eau claire mais ne laisse pas passer des effluents trop chargés en matières solides[10].

Les modalités et le temps de transfert des polluants sont très variables, ils font appel à trois processus distincts : les caractéristiques des sols et leur humidité, les réactions chimiques des molécules avec l'eau et le milieu, l'activité microbienne etc. Ainsi, une nappe peut être protégée pour un type de pollution et ne l'est pas pour une autre[5].

La propagation et l'évolution des polluants, de la surface aux lieux d'utilisation s'effectuent en trois étapes : le transfert dans le sol, le transfert dans la zone non saturé et le transfert en milieu saturé. Le processus de transfert de polluant est montré par la figure2 [11].



**Figure 2 : Schématisation du transfert de soluté dans le système sol- zone non saturée –
nappe**

1. Le transfert dans le sol :

Grâce à ses propriétés d'adsorption et d'échange, dues à la présence de colloïdes minéraux et organiques, le sol peut retenir un grand nombre de substances très diverses. Les interactions chimiques entre les solides peuvent être très complexes. Plus la molécule est grosse, mieux elle sera adsorbée sur les argiles et la matière organique. L'hydrophobicité d'une molécule favorise son accumulation dans le sol. Les composés constitués de carbone sont hydrophobes. Ceux composés d'azote, de soufre, d'oxygène ou de phosphore sont hydrophiles. Son caractère hydrophile favorise sa lixiviation et donc son transfert à la nappe. Certaines molécules sont résistantes, sur de très longues périodes, à toute action de dégradation. L'accumulation peut être due également à des conditions non favorables au développement des microorganismes (manque de nutriment par exemple). Les polluants et leurs produits de dégradation peuvent aussi être piégés temporairement par les animaux ou les végétaux C'est le phénomène de bioaccumulation. Le sol joue donc un rôle fondamental dans la fixation des micropolluants.

2. Le transfert dans la zone non saturée :

Les polluants traversent la zone non saturée qui joue un rôle d'autoépuration naturel. Les polluants sont mis en solution et constituent un soluté se déplaçant selon le type de sol, la dose de polluants et les conditions climatiques. Le soluté se déplace suivant une direction sub verticale jusqu'à la surface piezométrique. C'est dans cette zone que l'eau souterraine acquiert ses caractéristiques physico-chimiques et biologiques. Elle est caractérisée par la présence d'air, de minéraux argileux, d'oxyde et d'hydroxydes, de matières organiques (humus) et d'acides

humiques. Les phénomènes de fixation ou de dégradation se passent également dans cette zone. Ces phénomènes sont présentés par les transformations chimiques de type oxydoréduction, précipitation, hydrolyse, complexation avec d'autres substances et biodégradation des molécules organiques.

3. Le transfert en zone saturée :

Une fois la surface piézométrique franchie, la propagation du polluant ne rencontre pratiquement plus d'obstacles. Dans l'aquifère en raison de l'absence d'oxygène, de matières organiques et de microorganismes, l'autoépuration est très réduite. Seule la dilution y agit, d'où un fort renouvellement est favorable à l'élimination de la pollution.

L'autoépuration naturelle du sol est provoquée par les principaux mécanismes suivants : les mécanismes physiques, les mécanismes hydrodynamiques , les mécanismes hydrochimiques et les mécanismes hydro biologiques.

a) le mécanisme physique :

L'autoépuration du sol peut être conditionnée par la solubilité et la densité du polluant.

Une substance miscible devra vaincre les forces de la capillarité du sol. Les polluants insolubles et plus denses que l'eau comme les organochlorés migrent jusqu'à la nappe sans laisser de traces derrière eux. Une fois arrivés à la nappe, les polluants continuent à descendre jusqu'à la base, puis migrent dans le sens du pendage. Peu ou pas biodégradables, ils polluent la nappe pour des durées très longues. Ils sont très difficiles à localiser et à éliminer.

Les différences de densité accélèrent le phénomène de stratification de l'eau souterraine. Le mélange entre eau et soluté devient plus difficile.

b) le mécanisme hydrodynamique et hydro cinématique :

L'entraînement par l'eau en écoulement, un vecteur de la migration des substances, est le mécanisme fondamental de la propagation de la pollution dans le milieu souterrain. La vitesse de déplacement du soluté est souvent différente de celle de l'écoulement de l'eau souterraine, le polluant a une vitesse spécifique.

c) le mécanisme hydro chimique :

Les phénomènes d'échanges d'ions ou d'échange de base, d'attraction moléculaire et diélectrique, sont caractérisés par l'adsorption (eau gravitaire vers le corps solide) prédominante sur la désorption (corps solide vers eau gravitaire). Ces phénomènes sont favorisés par la

présence d'argiles, d'oxydes et d'hydroxydes et par les matières organiques. Ces échanges s'appliquent essentiellement sur les cations. Les anions sont rapidement et totalement transférés par l'eau souterraine.

d) le mécanisme Hydro biologique :

Le mécanisme réside sur la biodégradation. Un milieu riche en matières organiques nutritives favorise le développement des microorganismes. Une lutte pour la vie s'engage, les bactériophages se développent et éliminent les bactéries pathogènes qui sont les plus fragiles. Elles disparaîtront totalement après une trentaine de jours.

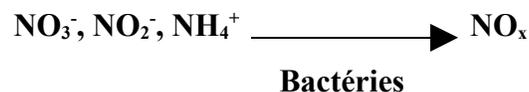
I-5-2 Les devenir des polluants :

- Le devenir des nitrates (NO_3^-)

Le cycle de l'azote dans le sol est caractérisé par son absorption par les végétaux et par la dénitrification. Ces processus varient dans le temps et l'espace. Cet ion ne présente pas de faculté de complexation ou d'adsorption. Il est très mobile.

• La dénitrification :

C'est la transformation de l'azote minérale (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+) en azote gazeux (NO_x). Elle a lieu sous l'action de certaines bactéries, en milieu anaérobie et riche en matière organique. Le processus varie selon de nombreux facteurs : la température, le pH, l'acidité du milieu . etc.



Comme le NO_3^- est peu retenu par le sol, il passe directement dans l'eau, l'activité de dénitrification dans la zone non saturée est ainsi réduite.

• La rétention par absorption :

La végétation assimile les nutriments (NO_3^- et PO_4^{3-}) pour sa croissance, donc elle immobilise pendant un temps donné une partie des éléments fixés par le sol.

-Le devenir des phosphates (PO_4^{3-})

• la sédimentation :

Les phosphores particuliers sont associés aux éléments fins du sol qui retient plus ou moins bien le phosphore en fonction de son origine, de la capacité de rétention et d'adsorption du sol. Cette rétention dépend également du fait que la zone humide est traversée par un flux important d'eau.

- **l'absorption :**

La végétation et les microorganismes sont des accumulateurs de phosphore. Ce dernier est relargué dans le milieu lors de la décomposition de leurs tissus s'il est à l'état dissous (PO_4^{3-}).

Il y a un équilibre entre la phase adsorbée aux particules du sol et la phase dissoute dans l'eau. Quand la concentration dissoute dans le sol diminue, les phosphates accrochés aux éléments du sol sont relargués dans l'eau [12].

I-5-3 Migration des pollutions bactériennes [7]

C'est le flux d'eau souterraine qui permet la migration de ce type de pollution.

Selon l'OMS, en zone non saturée et en l'absence de flux d'eau, la migration de la pollution est très limitée. L'OMS propose une profondeur de 3 m maximale et une propagation latérale quasi inexistante. Néanmoins, en cas d'infiltration massive d'eau de surface (forte pluie par exemple), l'entraînement peut être plus important.

- en zone saturée et en milieu continu, pour des vitesses de flux de 1 à 3 m par jour, l'OMS propose une distance maximale de propagation dans la direction du flux de 11 m.
- en zone fracturée ou karstique, l'écoulement est difficilement prévisible mais généralement très rapide. La pollution peut être transportée sur des distances considérables.

I-6 LA QUALITE DE L'EAU SOUTERRAINE

La qualité de l'eau souterraine peut varier rapidement surtout quand il s'agit de la contamination fécale. Une eau de source de bonne qualité, pendant la saison sèche peut être fortement contaminée quand il commence à pleuvoir, surtout si elle n'est pas suffisamment protégée [13].

Le principal moyen disponible sur le terrain pour estimer la qualité de l'eau est l'enquête sanitaire complétée par des analyses physico-chimiques et bactériologiques [13].

Une enquête sanitaire est nécessaire pour aider à identifier les sources de risque de contamination qui ne sont pas décelées par les analyses physico-chimiques et bactériologique [7]. Elle permet de relever la vulnérabilité de l'eau par rapport à la pollution.

Pour illustrer, un exemple de type d'enquête sanitaire d'un point d'eau, standard, appliqué en Indonésie [13] est présenté en Annexe 5

I-7 LA PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU

Pour maintenir la qualité naturelle de l'eau, il est indispensable de prendre des mesures visant à protéger les ressources contre les pollutions.

Le périmètre de protection est désigné pour définir la zone d'un point d'eau dans laquelle des substances polluantes peuvent pénétrer et contaminer l'eau [14]. Pour un pays, chaque point d'eau a son périmètre de protection suivant la norme proposée.

En milieu continu, l'OMS propose une distance de sécurité de 15 m en aval des latrines. Dans les terrains fissurés et les karts, il est impossible de parler de norme.

Toutes les sources de pollutions potentielles doivent être écartées du périmètre immédiat du point d'eau [7].

Même aux endroits où nous ne pourrions pas utiliser l'eau souterraine directement comme réserve d'eau potable, nous devons néanmoins protéger l'eau souterraine car elle acheminera les contaminants et polluants des terres vers les lacs et les cours d'eau d'où d'autres personnes prélèvent un fort pourcentage de leurs réserves d'eau douce.

Pour une protection suffisante d'un point d'eau, voici un schéma montrant l'estimation du périmètre de protection selon OMS [7].

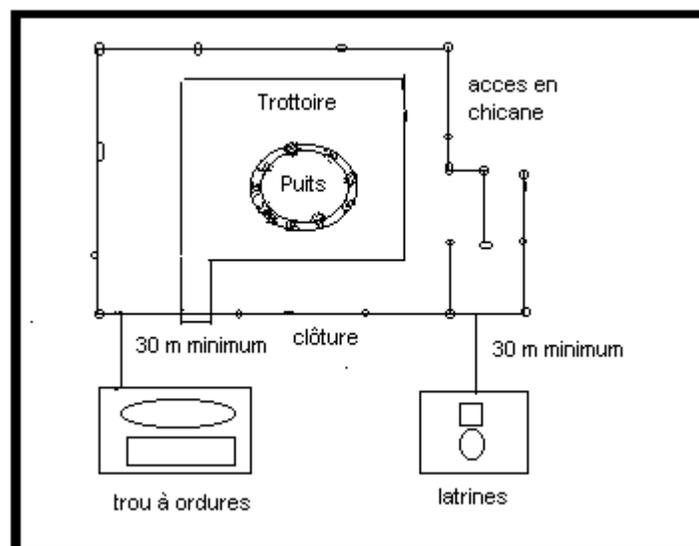


Figure 3 : Périmètre de protection d'un puits ou forage en milieu continu

I-7-1 Norme malgache relative aux périmètres de protection

La norme Malgache a évoqué 3 sortes de protection : la protection immédiate, la protection rapprochée et la protection éloignée.

1. La protection immédiate est le captage lui-même. Elle a pour fonctions de protéger les ressources en eau, d'empêcher la détérioration des ouvrages de prélèvement et de l'environnement, et d'éviter que des déversements ou des infiltrations de substances polluantes se produisent à l'intérieur ou à proximité immédiate du captage.
2. La protection rapprochée vis à vis de la migration des polluants.
3. La protection éloignée contre les pollutions diffuses et permanentes.

II : LA POTABILITE DE L'EAU

II-1. DEFINITION DE LA POTABILITE

Pour être potable, l'eau doit d'abord être claire, inodore, sans mauvais goût et pour ne pas porter atteinte à notre santé, elle doit respecter de multiples autres exigences souvent difficiles à évaluer avec nos propres sens. Ainsi pour l'eau de puits, même sans avoir traité pour être bue, elle doit suivre la norme selon l'article 7 de la norme malgache [15] (Annexe 1).

II-2 LES DANGERS ENGENDRES PAR LES PARAMETRES INDICATEURS DE POLLUTION

Introduction :

L'eau est à la fois indispensable à l'homme et un vecteur essentiel de maladies. Dans les pays en voie de développement sa qualité déficiente contribue à la persistance d'épidémies particulièrement dévastatrices. Cette qualité est mesurée par des paramètres regroupés en [9] :

- Paramètres organoleptiques : couleur, turbidité, odeur, saveur...
- Paramètres physico-chimiques : pH, température, conductivité, ...
- Paramètres concernant les substances indésirables : nitrites, nitrates, phosphates, fer...
- Paramètres concernant les substances toxiques : métaux lourds(arsenic, chrome, ...)

- Paramètres microbiologiques

1. pH [9] :

Le pH mesure l'acidité et la basicité de l'eau. Il dépend de l'origine de l'eau et de la nature des terrains qu'elle traverse. Le pH est lié à d'autres aspects de la qualité de l'eau de boisson, qu'il est difficile de savoir s'il exerce une influence directe sur la santé dans la fourchette des valeurs généralement observée. Des pH inférieurs à 7 peuvent provoquer une corrosion sévère des tuyauteries métalliques conduisant à une augmentation des concentrations de certaines substances métalliques (plomb, cadmium). Des pH supérieurs à 7 entraînent une diminution de l'efficacité du processus de désinfection au chlore.

2. Conductivité [9] :

Elle reflète la concentration de l'ensemble de minéraux dissous. La minéralisation de l'eau peut entraîner, selon les cas, un goût salé. La conductivité en tant que telle n'a pas d'effet sur la santé.

Les eaux de boissons sont classées selon leur conductivité comme suit :

Tableau 1 : Classification des eaux de boisson selon leur conductivité [9]

conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	minéralisation	qualité de l'eau
$C < 100$	Très faible	Excellente
$100 < C < 200$	Faible	Excellente
$100 < C < 400$	Peu accentuée	Excellente
$400 < C < 600$	Moyenne	Bonne
$600 < C < 1000$	Importante	Utilisable
$C > 1000$	excessive	Utilisable

3. Température [9] :

L'augmentation de la température a pour conséquences une croissance bactérienne, une augmentation des odeurs dues aux composés volatils, une augmentation ou une diminution de la solubilité d'un soluté, etc.

4. Turbidité [9] :

La turbidité est due à la présence de matières en suspension (argile, limons, particules fibreuses, particules organiques colloïdales, plancton). Elle est un des indicateurs de présence de matières organiques. Les risques sur la turbidité sont liés aux bactéries qui se fixent sur les particules en suspension. Ces bactéries sont ainsi protégées des désinfectants.

5. Nitrate [9] :

Sans apport artificiel, le nitrate se retrouve naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines. Leur concentration naturelle dans les eaux souterraines en l'absence de fertilisant est inférieure à 15 mg L⁻¹. Ils ont pour origine des déjections humaines (urines d'animaux, excréments), des engrais, une décomposition des matières organiques, des effluents, etc.

Les nitrates sont des sels très solubles qui sont facilement entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration.

Concernant les effets sur la santé, les nitrates ingérés se transforment en nitrites dans l'estomac, le phénomène est accentué chez les nourrissons. A court terme, ces nitrites peuvent provoquer la transformation de l'hémoglobine du sang en méthémoglobine, qui perturbe le transport de l'oxygène dans le sang. Le nourrisson y est très sensible (« maladie bleue » lors de consommation d'eau ayant une forte concentration en nitrates). De nombreuses études ont recherché des liens entre l'exposition aux nitrates et le développement de cancers.

6. Phosphate [9] :

Le phosphate provient de la décomposition de la matière organique, par lessivage des minéraux, les rejets domestiques (poly phosphate des détergents), les engrais et les rejets industriels. En général, la présence de phosphore dans les eaux souterraines est un indice de pollution.

7. Fer et Manganèse [9] :

Ils proviennent du lessivage des terrains, de la dissolution des roches et des minéraux contenus dans le sous sol, des rejets industriels, des corrosions des canalisations métalliques.

Le Fer est fréquemment associé au Manganèse avec lequel il a la propriété de coprécipiter.

Ils entraînent des effets indirects gênant pour l'homme car ils neutralisent les désinfectants. Ils produisent des inconvénients d'ordre organoleptique. Ils donnent du goût métallique à l'eau. Le Manganèse donne de couleur noire à l'eau à partir de 0,05 mg.L⁻¹ et le Fer donne à l'eau la couleur rouge à des concentrations supérieures à 0,3 mg.L⁻¹.

8. Le fluor [9] :

Le fluor est employé dans les industries de traitement de surface, de la céramique, engrais, etc.

Une carence ou un excès en fluor provoque des inconvénients, alors que des doses modérées sont bénéfiques pour la santé. Par exemple des concentrations plus de 4mg.L⁻¹ donnent le fluorose osseuse (douleur osseuse et articulaire accompagnées de déformations).

9. Coliformes totaux [9] :

Les bactéries coliformes existent dans les matières fécales mais se développent également dans les milieux naturels (sol, végétation, eaux naturelles). La présence d'un petit nombre de coliforme (1 à 10 /100ml) dans les eaux souterraines non traitées n'a qu'une signification réduite sur le plan sanitaire, lorsqu'elle ne s'accompagne pas de coliformes fécaux

10. Escherichia coli (E.coli) [9] :

L'*Escherichia coli* constitue l'espèce dominante du groupe des coliformes thermo tolérants. C'est une bactérie spécifiquement d'origine fécale dont le réservoir est le tractus digestif des animaux à sang chaud. La présence d'*Escherichia coli* devra être considérée comme signe d'entrées d'eaux

parasites dans la ressource et pouvant associer la présence de germes pathogènes et devra nécessiter une protection de l'ouvrage.

III APPROVISIONNEMENT EN EAU DE LA ROVINCE DE TOAMASINA

Le bassin sédimentaire du côté Est dispose d'une forte pluviométrie annuelle de 2000 à 3000 mm. Les eaux de surface sont abondantes mais elles sont exposées aux invasions salines le long de la côte.

La ressource en eau souterraine provient de diverses nappes : la nappe d'alluvion, la nappe de sable de plage, la nappe du crétacé.

- la nappe d'alluvion : elle a de faible profondeur donc le risque de pollution n'est pas à exclure. Elle est à forte teneur en fer. Le débit spécifique de la nappe est de 11 à 28 L.s⁻¹.m⁻².
- la nappe de sable de plage : l' hauteur d'eau est de 5 à 10 m, il y a des invasions salines, les eaux sont agressives et à forte teneur en fer. Le débit spécifique est de 0,5 à 6 L.s⁻¹.m⁻².
- de la nappe du crétacé : la profondeur de la nappe est environ 20 m. Les eaux sont minéralisées et le pH est basique. Le débit spécifique est de 0,18 L.s⁻¹.m⁻².

La répartition des ménages selon la source principale d'eau potable pour la province de Toamasina est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Les principales sources d'eau à boire dans la province de Toamasina [11]

Ressources d'eau	Taux (%)
Plomberie intérieure	1,2
Robinet intérieur	1,3
Robinet privé extérieur	0,5
Eau de pluie	0,0
Vendeur d'eau	0,0
Service camion citerne	0,0
Robinet public	8,5
Puits avec pompe	9,7
Puits sans pompe couvert	9,5
Puits sans pompe non couvert	1,9
Source protégée ou couverte	0,8
Source non protégée	10,5
Rivière, lac, marais	56,5
	0,1

La grande majorité des ménages pour la province de Toamasina s'approvisionne en eau dans les rivières, dans les lacs et dans les marais (56,5 %). Le taux d'accès à l'eau contrôlée est de 31 % (eau provenant d'une utilisation plus ou moins contrôlée telle que les branchements particuliers, les bornes fontaines, les forages et puits munis de pompe à motricité humaine et l'adduction d'eau gravitaire).

CHAPITRE II

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

I MONOGRAPHIE DE LA REGION DE MAHANORO

I-1 LOCALISATION DE MAHANORO

Mahanoro est un district de la province de Toamasina. Il est situé sur la côte Est de Madagascar à 10 km au nord de l'embouchure du fleuve Mangoro. Le district est traversé par le canal des Pangalanes qui longe le littoral Est sur une longueur de 165 km [16]. Mahanoro est subdivisé en 10 communes dont : Tsaravinany, Manjakandriana, Mahanoro, Ambinanidilana, Ankazontsifantatara, Ambodiharina, Ambinanindrano, Masomeloka, Befotaka et Ambodibonara. L'agglomération se situe en bord de mer. La ville s'est développée au nord de l'estuaire sur des sables surélevés à la côte plus de 3 m. Au sud de l'estuaire, des résidences administratives sont groupées sur une butte comprise entre 12 et 24 m d'altitude. Mahanoro est localisée dans la figure(4).

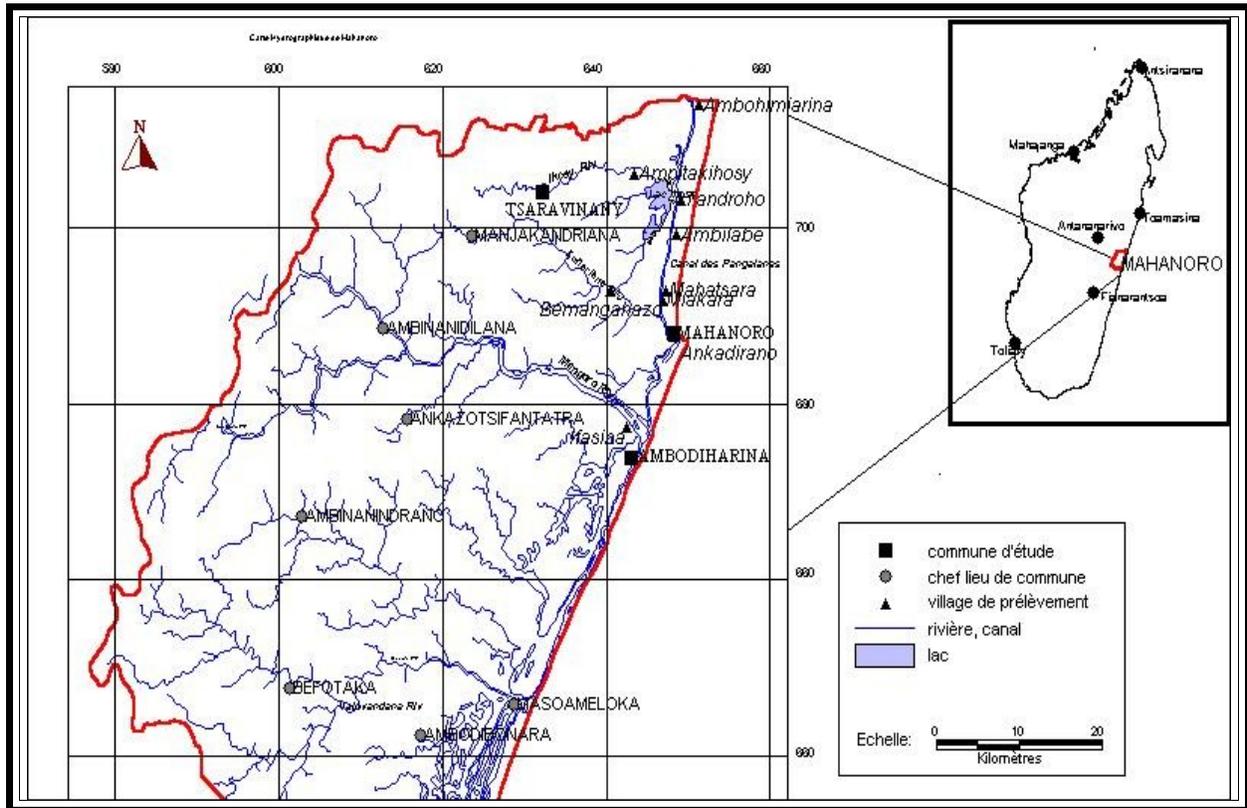


Figure 4 : Localisation de Mahanoro

I-2 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DE MAHANORO

I-2-1 Situation géologique

De l'Est en Ouest, on observe [17] :

1. une bande de sables côtiers environ 2 km de large .
2. une bande alluviale de 4 km de large environ. C'est dans cette bande que se situent tous les lacs de la région.
3. une zone de colline sédimentaire constituée de grès et d'argile du crétacé supérieur.
4. une zone de montagnes formées de socles cristallophylliens. A la hauteur de Mahanoro en direction sud, il y a un immense épanchement basaltique.

La figure (5) présente la carte géologique du district de Mahanoro.

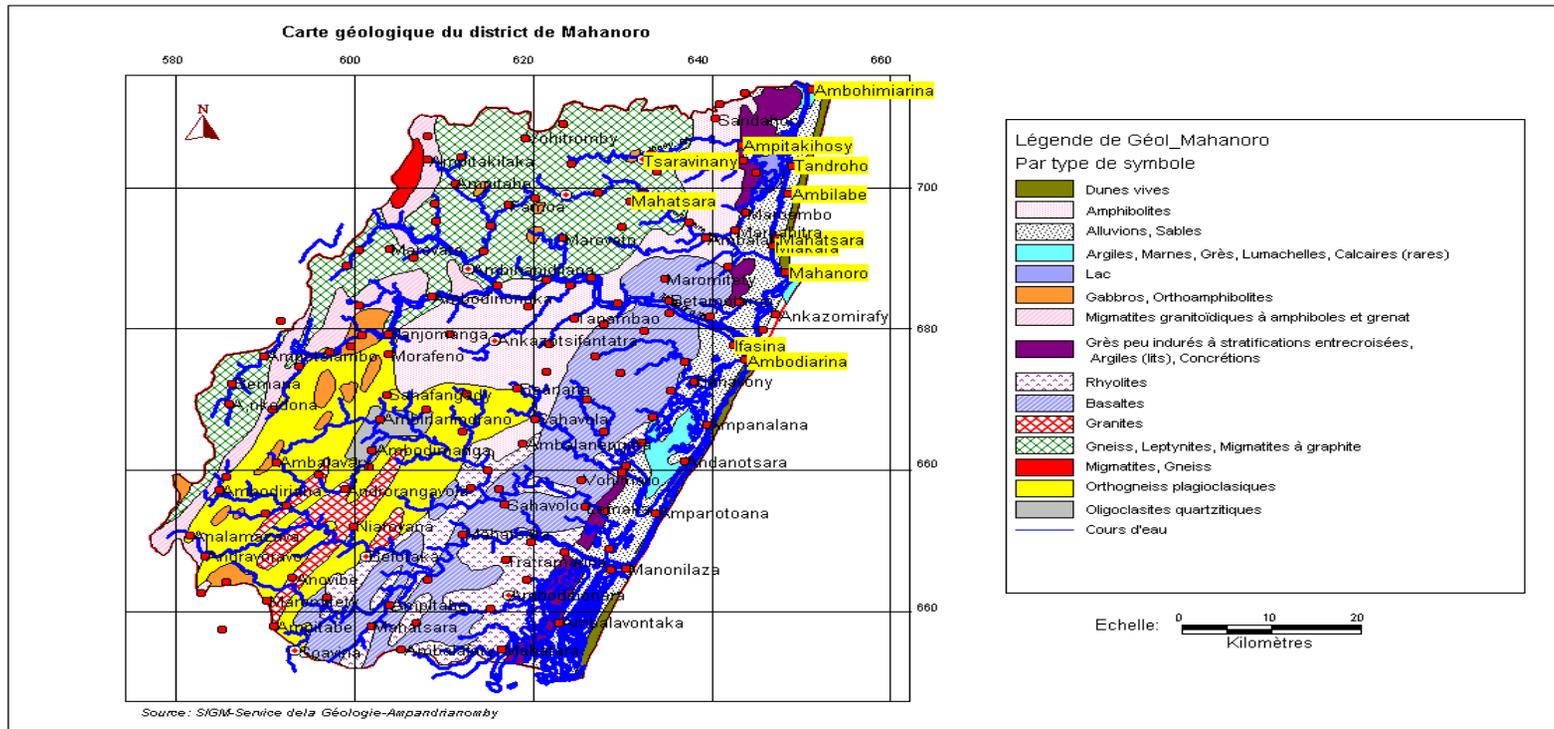


Figure 5 : Carte géologique du district de Mahanoro

I-2-2 Recharge des couches aquifères

Les précipitations jouent un grand rôle dans l'alimentation des différents niveaux superficiels. Il pleut 191 à 237 jours par an. Cette pluviométrie importante et continue explique la pérennité des rivières en provenance du relief et la faible fluctuation du niveau statique des nappes [18].

La nappe de sables côtiers est limitée à l'Est par la mer, au Sud et à l'Ouest par la rivière Sahasaka. Le maximum du niveau piezométrique de la nappe est de 2,5 m au centre et 0,2 à 0,5 m lorsqu'on rapproche le niveau de base

I-2-3 Les sites de prélèvement

Pour les sites et les points d'eau étudiés, l'échantillonnage a été un choix raisonné.

3 communes sur les 10 ont été choisies pour diverses raisons : accessibilité, temps disponible, prévalence des maladies d'origine hydrique comme le choléra qui s'y étaient manifestées. Les points d'eau les plus utilisés par la population de certain village ont fait l'objet de l'étude.

80 points d'eau utilisés comme source d'eau potable ont été sélectionnés. Ainsi, ils se répartissent sur les 3 communes à savoir :

- la commune de Mahanoro : 64 points d'eau ont été retenus. Ils se répartissent dans les villages de Ambalamangahazo, Ankadirano, Ambalakininina, , Tandroroho, Ambilabe, Mahatsara, Miakara, Androhomanasa et Ambohimiarina.
- la commune de Tsaravinany : 4 points d'eau ont été retenus dans le village d'Ampitakihosy
- la commune d'Ambodiharina : 12 points d'eau dans les village d'Ambodiharina et Ifasina ont été retenus. Les villages où l'on a fait les prélèvements d'eau sont présentés dans la figure 6 ci-dessous.

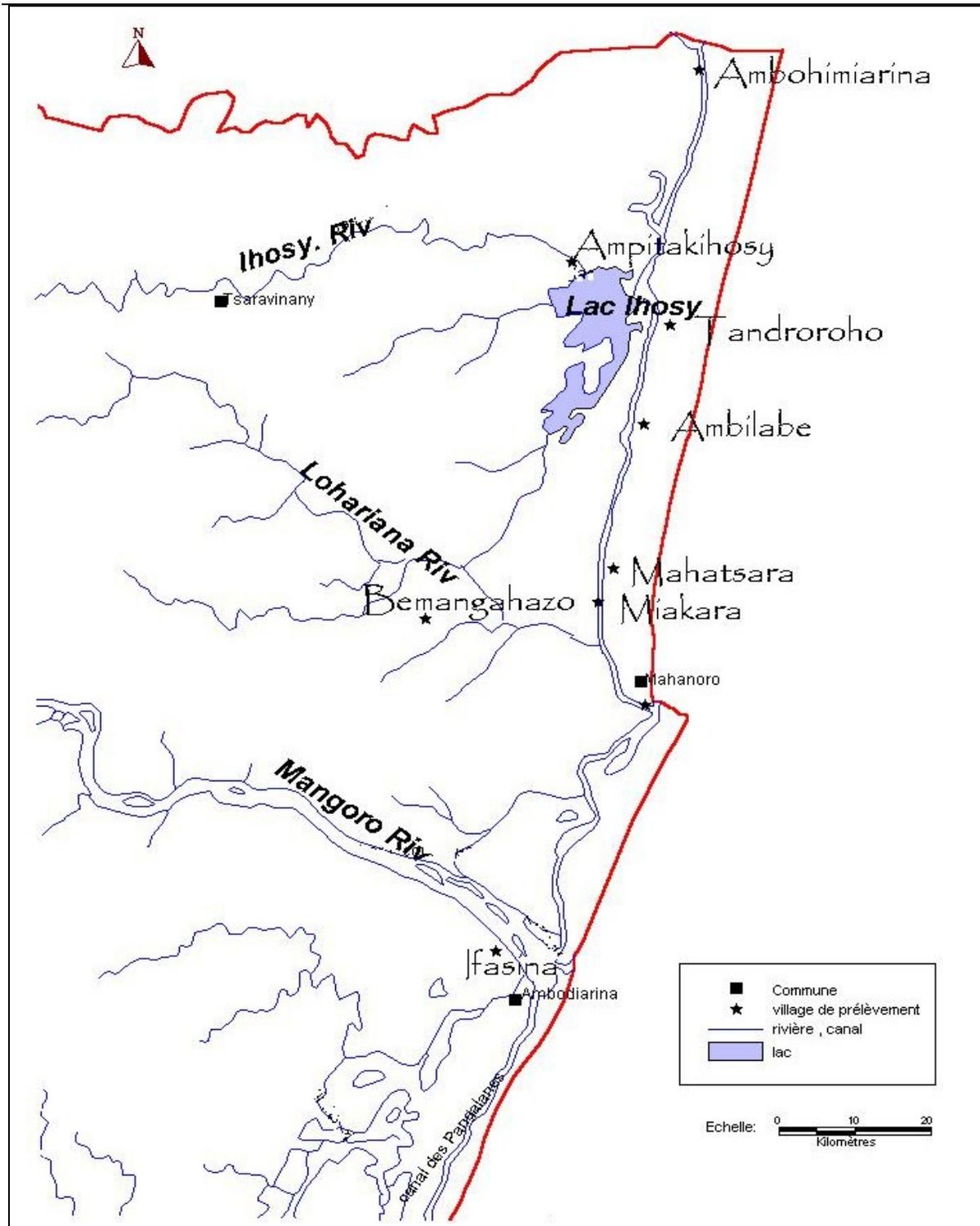


Figure 6 : Les sites de prélèvement