

e) LA CONDUCTIVITE

On peut classer la qualité de l'eau par la mesure de sa conductivité électrique. L'eau de pluie a une valeur moyenne de 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquavalor, 2005). La norme de potabilité Malagasy fixe une directive sur la valeur de la conductivité électrique inférieure à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La conductivité de tous les eaux échantillonnées, à l'exception de celles de R03 et R09 présentent des résultats très faibles. On trouve une moyenne de 211 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 246 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs sont très proches de la conductivité électrique de l'eau de la JIRAMA. La plupart des échantillons présentent des valeurs de conductivité proches de celle de l'eau de pluie.

La conductivité à R03 Andoharanofotsy est la plus élevée de 1398 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci est probablement dû à la pollution de la nappe par infiltration de lessivage d'ordure en surface ou encore de l'utilisation de solution de sureau comme agent désinfectant.

f) L'AMMONIUM

L'ion ammonium (de formule NH_4^+) est un ion polyatomique de charge électrique positive (c'est donc plus précisément un cation polyatomique). Il est obtenu par protonation de l'ammoniac (NH_3); il est parfois présenté comme une molécule d'ammoniac ionisée. Il est présent dans de nombreux produits nettoyants et désinfectants.

Sa présence est à rapprocher des autres éléments azotés identifiés dans l'eau (nitrites et nitrates) et des résultats de l'analyse bactériologique. L'ammoniaque peut être rencontré dans les eaux de pluie (0,1 à 2 mg/l) et dans celles provenant des sols tourbeux et marécageux ; dans ce dernier cas, elle a une origine purement végétale. Habituellement, les eaux souterraines sont pauvres en azote ammoniacal. Mais des eaux issues de sols riches en substances humiques ou riches en fer peuvent présenter des teneurs de l'ordre de 1 à 3 mg/l.

La teneur en ammonium est généralement très faible, teneur inférieure à 1mg/L si la norme est de 0,5 mg/L, pour la plupart des échantillons. Seul le point R03 présente une valeur très remarquable de 4,31 mg/L en période d'été qui signifie probablement une infiltration venant de fosse perdu à moins d'un rayon de 15m. La présence d'azote ammoniacal en quantité relativement importante peut être l'indice d'une pollution par des rejets d'origine humaine ou industrielle (industries chimiques, engrais, azotés, cokeries, fabrique de glace, industries textiles...).

Dans notre cas ici, les points d'échantillonnages les plus suspects se trouvent dans des zones habitées comme Andoharanofotsy (R03) et Ambohidratrimo (R21), ou dans des zones proches de la plaine alluviale comme Ambohimanarina (R17), et Ambohitrimanjaka (R09). La présence d'ammonium dans les eaux est due à des rejets d'origine humaine (point proche de fosse perdue, eaux usées domestiques), industrielle ou végétale (engrais).

g) LE NITRATE

Les nitrates sont les sels de l'acide nitrique, de formule chimique NO_3^- . La présence de nitrate dans l'eau est un indice de pollution d'origine agricole, urbaine ou industrielle. Ils sont une cause importante de l'eutrophisation dans les eaux douces, les eaux saumâtres et les eaux salées fermées ou peu renouvelées. Malgré ceci, les nitrates ont aussi des effets positifs sur la santé humaine comme l'effet antibactérien par l'effet du nitrate salivaire transformé en nitrite acidifié, la réduction, chez les hommes, de risque de pathologie vasculaire cérébrale et d'hypertension artérielle (Bockman et Coll, 1997), ou encore de la propriété anticarcinogénique des nitrates de l'eau de l'alimentation. Les apports alimentaires en nitrate joueraient un rôle bénéfique en relaxant la musculature lisse de l'estomac et en protégeant sa muqueuse.

Selon la norme de potabilité malagasy, le nitrate doit être inférieur à 50 mg/L. Les résultats des analyses, issus des tableaux III et tableau IV, pour les deux périodes présentent des valeurs supérieures à cette norme. Pour les points R03, R04 et R07, nous avons des concentrations en nitrate égales à 199,24 mg/L, 70,48 mg/L et 81,39 mg/L en période d'étiage et pour les points R03 et R16, nous avons des concentrations en nitrate égales à 144,36 mg/L et 53,01 mg/L. Ce qui signifie que les aquifères de ces zones sont très vulnérable à la pollution en surface car le nitrate est d'origine artificielle de surface (Turin A., 1990).

h) LE NITRITE

La teneur en nitrite (NO_2) dans l'eau potable est réglementée. En fait, c'est un élément toxique. Chez les hommes et les mammifères, la présence des nitrites dans le sang empêche l'hémoglobine de fixer convenablement l'oxygène. C'est l'une des causes de la «maladie bleue du nourrisson», plus savamment appelée «méthémoglobinémie». En milieu acide, comme c'est le cas dans l'estomac, les nitrites, souvent présents dans la charcuterie comme additifs,

forment avec les amines secondaires des nitrosamines toxiques, très vraisemblablement cancérigènes.

Pour la norme de potabilité malagasy, la concentration en nitrite ne doit pas dépassé 0,1 mg/L. Les analyses montrent que les points d'eaux présentent des résultats inférieurs à 0.1 mg/L. La valeur moyenne de la concentration en nitrite est de 0,042 mg/L et 0,035 mg/L en période d'été et en période de pluie. On a remarqué des valeurs indiquant des pollutions aux points R03 et R15 en période d'été avec respectivement 0,11 mg/L et 0,16 mg/L de nitrite et aux points R13 et R22 en période de pluie avec respectivement 0,16 mg/L et 0,22 mg/L de nitrite. Ce qui signifie que les eaux des nappes devraient être suivie et analysées semi-annuellement.

i) CALCIUM ET MAGNESIUM

Le calcium et le magnésium sont des éléments que l'on retrouve abondamment dans l'eau, le sol et la roche. La présence de calcium et de magnésium peut être détectée grâce à une analyse chimique. La présence de calcium dans l'eau potable est bénéfique et même parfois recommandée par les consommateurs, mais cet élément peut être nocif pour la santé à des concentrations très élevées. La concentration élevée en calcium et magnésium augmente la dureté de l'eau. L'eau très dure, ne doit pas être utilisé comme une ressource pour adduction d'eau potable. Selon la norme de potabilité vue dans le document de Wateraid et aussi la norme de potabilité malagasy, ils sont fixés à 200mg/l pour le calcium et 50mg/l pour le magnésium. Les concentrations en calcium et en magnésium des échantillons prélevés dans la zone d'étude sont toute inférieures à la norme de potabilité. La concentration moyenne en calcium et magnésium sont respectivement 10,5-12,6 mg/L et 5,5-9,4 mg/L en période d'été et en période de pluie. Il est donc sûr que la dureté élevée ne provient pas de ces deux éléments.

j) SODIUM ET CHLORURE

La présence de sodium et de chlorure dans l'eau souterraine est un phénomène normal. Cependant, leurs niveaux élevés dans les sources d'approvisionnement en eau potable peuvent causer un problème de santé aux personnes qui suivent un régime pauvre en sodium. Des niveaux élevés de sodium et de chlorure peuvent également avoir des répercussions sur le goût, l'arrosage de certaines plantes et peuvent augmenter la corrosivité de l'eau et

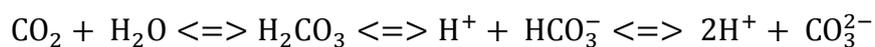
endommager la plomberie des maisons. Ici, les analyses montrent que les eaux ont des valeurs inférieures à la norme indiquée par la directive sur la norme de potabilité Malagasy sur l'eau fixe (la teneur en chlorure inférieure à 250 mg/L, le sodium n'a pas de valeur guide).

k) SULFATE

Le sulfate est présent à l'état naturel dans le sol et la roche. Par conséquent, sa présence dans l'eau souterraine est due à l'altération météorique des roches (dissolution de minéraux comme le gypse et l'anhydrite). Sa présence dans l'eau souterraine pourra aussi être d'origine artificielle (rejets industriels, dépôts de combustibles fossiles). Une quantité élevée de sulfate dans l'eau peut entraîner l'apparition d'un goût distinct et aussi la corrosivité. Les concentrations en sulfate dans les échantillons sont très faibles. Des concentrations maximales de 2,4 mg/L et 3,98 mg/L ont été relevées respectivement pour la période d'étiage et de pluie.

l) BICARBONATE

Dans la nature, le système carbonaté est très important et liée au processus de dissolution des roches. L'origine des bicarbonates et des carbonates est aussi liée à la dissolution de gaz carbonique (CO₂) dans l'eau. La présence des bicarbonates (HCO₃⁻) dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées. Dans l'eau, le dioxyde de carbone (acide carbonique), l'ion bicarbonate et l'ion carbonate sont en équilibre, en fonction du pH:



La caractéristique acide des eaux souterraines de la zone d'étude déplace les équilibres vers la gauche. L'origine de ces bicarbonates peut être due à l'attaque du gaz carbonique sur les roches. Les fortes teneurs sont enregistrées pendant la période de pluies avec une maximale de 36 mg/l.

m) FER

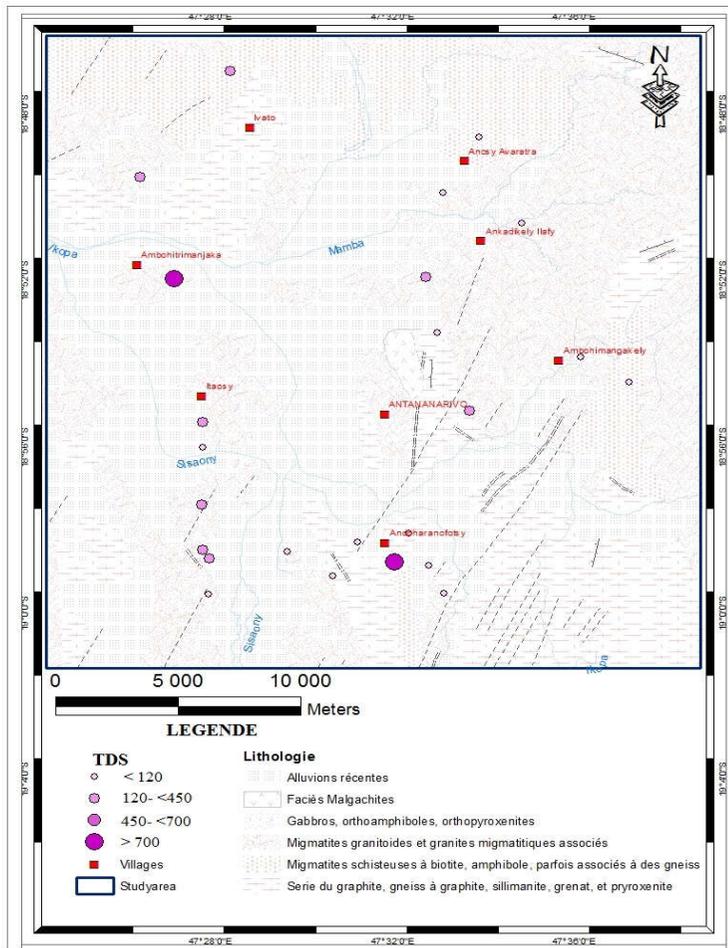
Le fer est un composant majoritaire de la croûte terrestre, il est présent sur toute la surface de la Terre. Très oxydable, il est peu présent des eaux de surface aérées. En revanche, dans les eaux souterraines, on en retrouve parfois des concentrations importantes. En effet, le fer se trouve en solution dans les eaux privées d'oxygène. Suivant les cas, il pourra exister à

l'état colloïdal, sous formes de complexes organiques ou minéraux. Au contact de l'air, on assiste à une précipitation due à l'oxydation de ce métal. Il n'y pas de valeur guide indiquée sur les normes de potabilité, ni par l'Etat Malagasy, ni par l'OMS. Quand même, une concentration élevée pourra influencer la limpidité de l'eau et aussi sa qualité. Dans notre cas, le fer n'a pas montré de valeur douteuse. La concentration maximale enregistrée est de 0.80 mg/L en période de pluie.

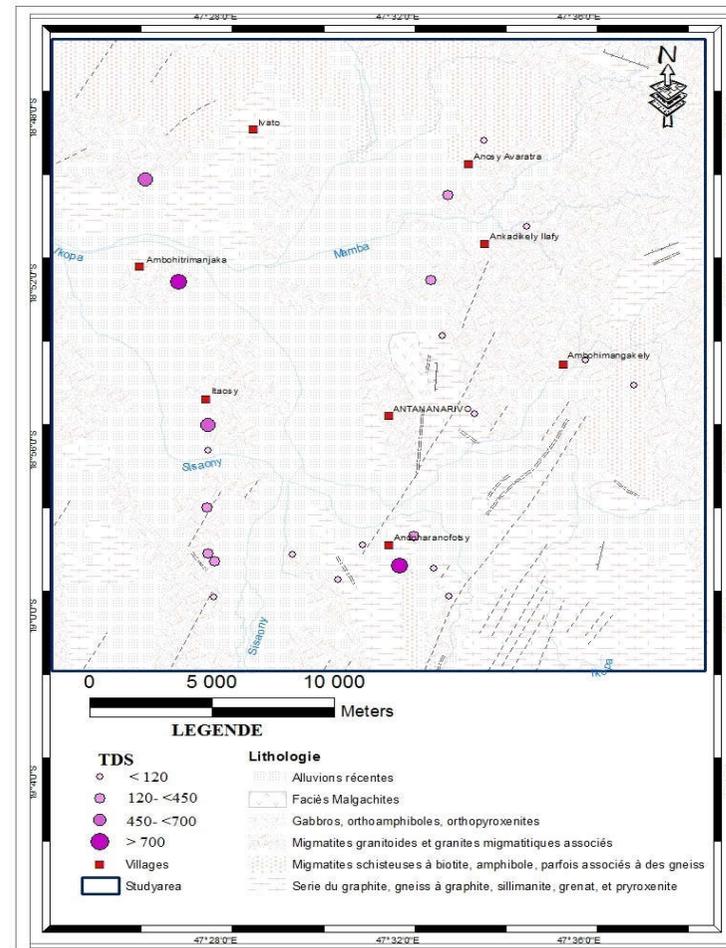
Les paramètres d'indice de contamination de la ressource

Comme on le sait, la présence du nitrate et de la matière organique dans l'eau ainsi que la valeur élevée de sa minéralisation totale sont des indices de contamination de la ressource par des polluants. L'acidité de l'eau augmente sa corrosivité. La minéralisation totale et le nitrate présentent ici des valeurs supérieures à la norme de potabilité. Les figures 2 et figures 4 illustrent les variations spatio-temporelles de ces paramètres de contamination

Le diagramme de Durova permis l'identification des eaux polluées par ces paramètres physico-chimiques.

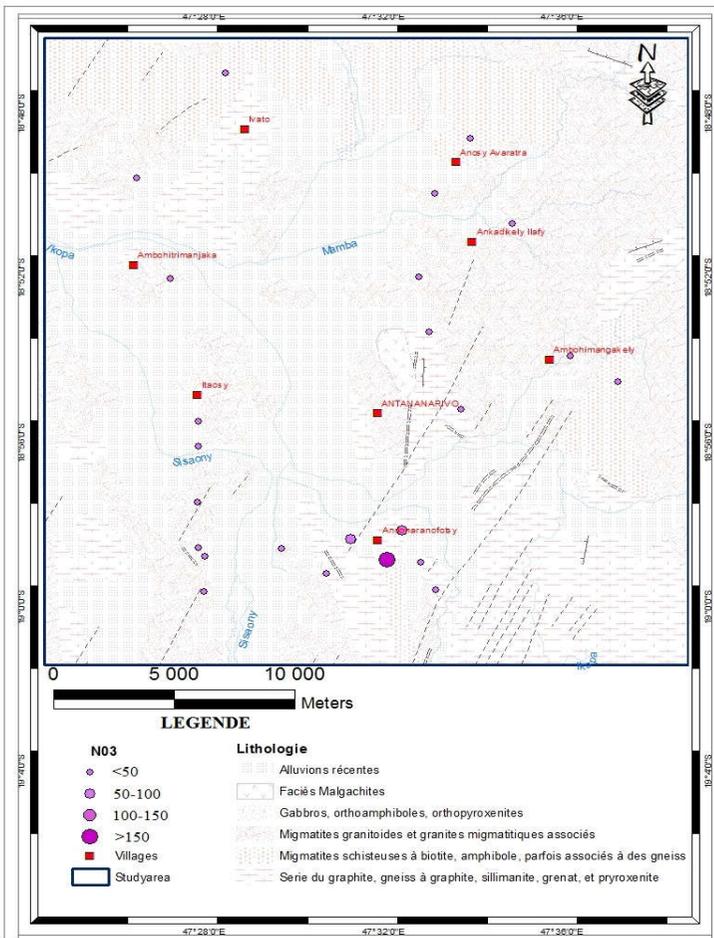


a, Minéralisation totale, saison sèche

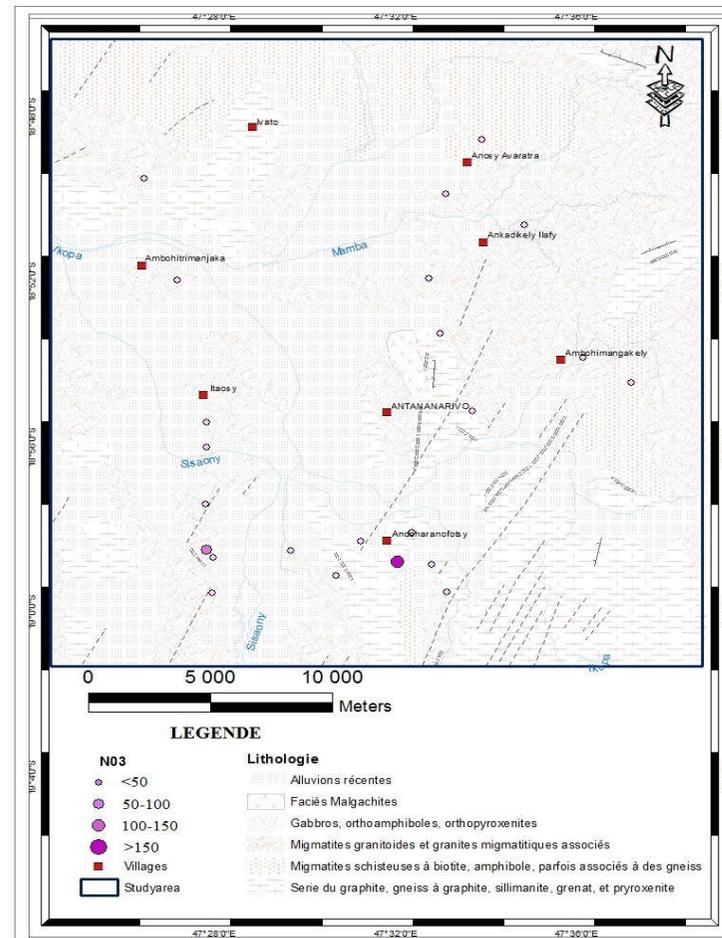


b, Minéralisation totale, saison de pluies

Figure 63: Répartition spatio-temporelle de la minéralisation totale des eaux souterraines



a, Concentration en Nitrates, période sèche



4-b, Concentration en Nitrates, période de pluie

Figure 64: Répartition spatio-temporelle de la concentration en nitrate des eaux souterraines

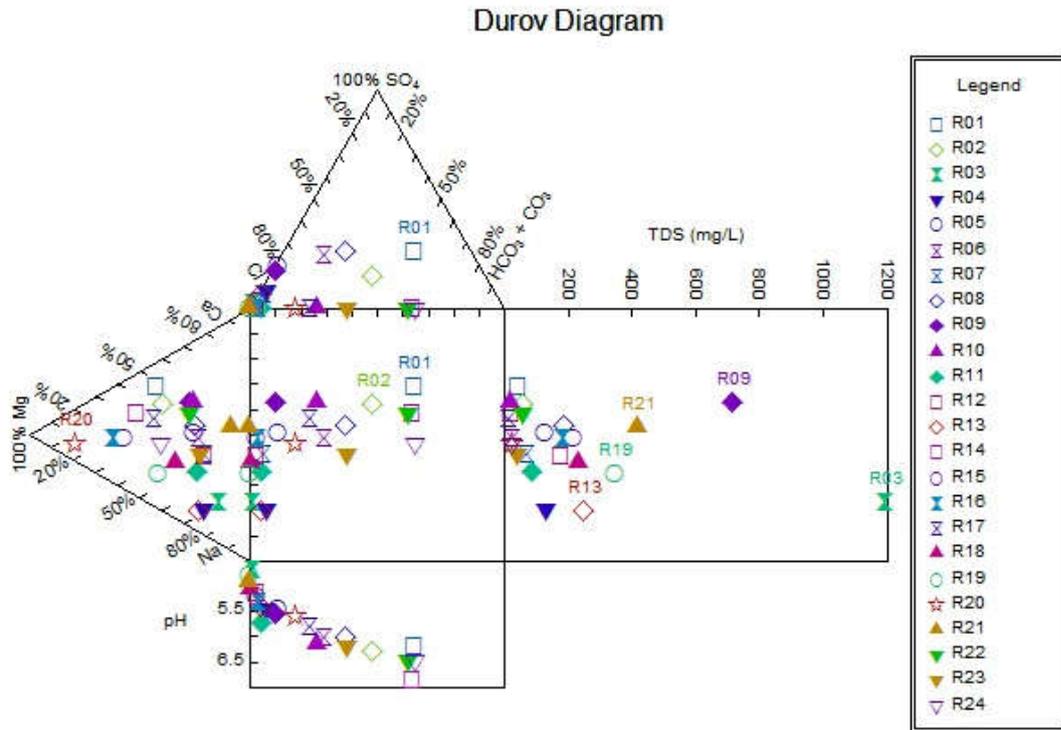


Figure 65 : Diagramme de Durov en période d'été

Deux types de points présentant des problèmes de contamination ont été choisis. Ils se trouvent dans des situations morphologiques différentes distances inter-électrodes $a = 3\text{m}$, $a = 5\text{m}$ et $a = 10\text{m}$ à partir du diagramme de Durov (Figure 65) et des clichés des points d'eaux (Figure 68) sur Google Earth. Ils sont considérés comme représentatifs des autres points d'échantillonnage. Ce sont les points R03 et R13. Les critères de choix de ces points sont : soit une concentration élevée en nitrate, présence de matière organique, minéralisation (TDS) élevée ; soit une mauvaise condition de l'état de lieu en surface identifiée pendant la descente sur terrain. La conception du fonctionnement de la contamination est considérée comme suit (figure 66, et figure 67).

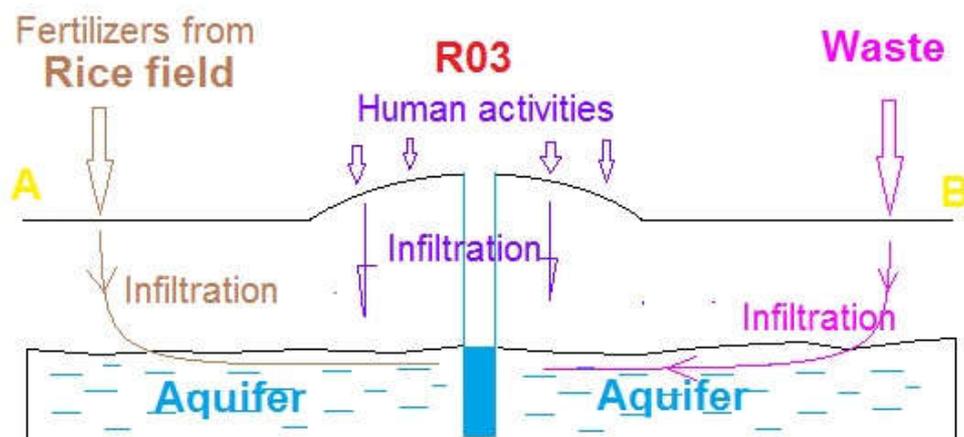


Figure 66: Conception de l'origine de contamination de l'eau souterraine en R03

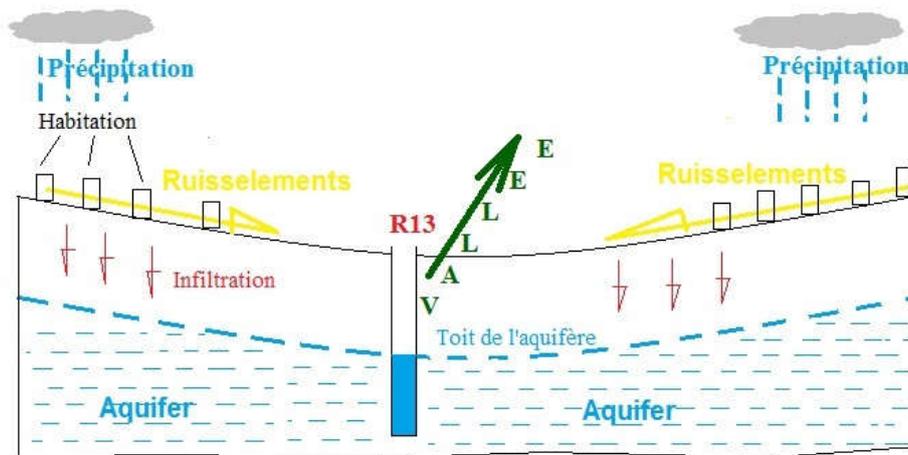


Figure 67 : Conception de l'origine de contamination de l'eau souterraine en R13

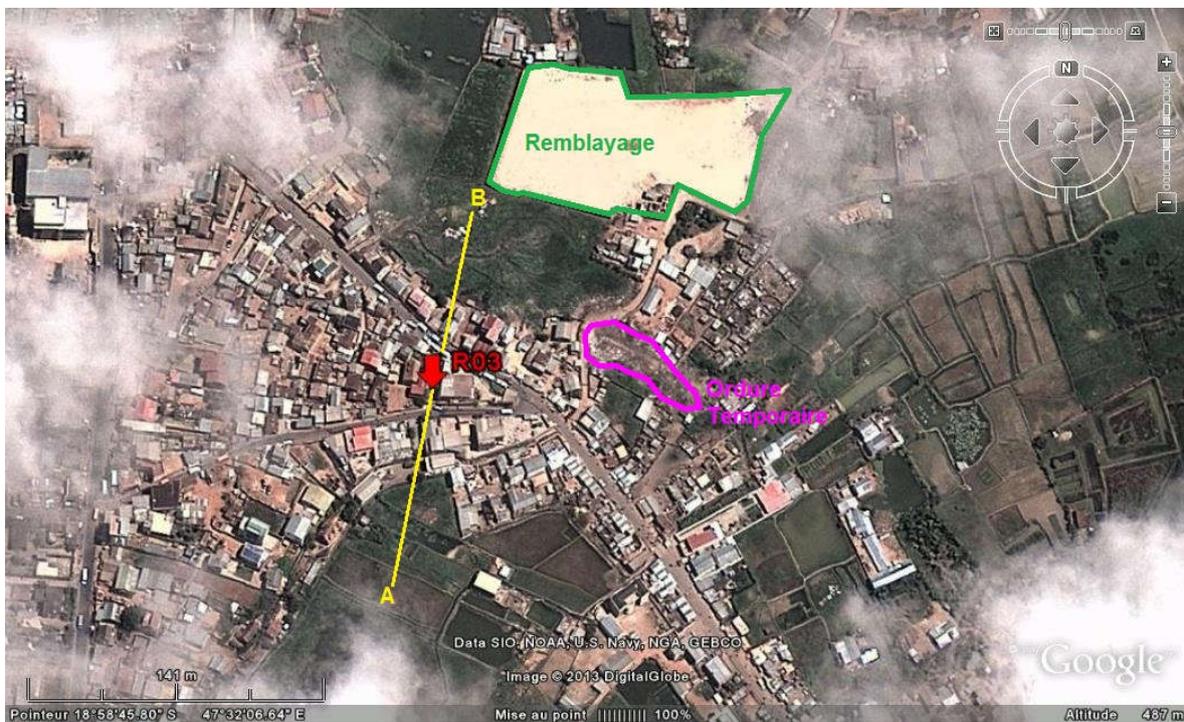


Figure 68 : Etat de lieu du puits R03

La contamination de la ressource en eaux souterraines de la zone d'étude se fait par le processus d'infiltration des eaux de précipitation, c'est-à-dire les polluants sont amenés par l'eau de pluie de la surface jusqu'à la nappe aquifère, figures 5 et 6. La pollution est soit d'origine anthropologique, soit d'origine agricole. Il est clair que la variation de la température de l'eau en fonction de la saison ainsi que la variation temporelle des autres paramètres physico-chimiques indique aussi la vulnérabilité de la nappe aquifère aux précipitations.

La minéralisation totale augmente en générale après les précipitations. Ceci est expliqué par le mode contamination de la ressource que nous venons de mentionner précédemment. En période de pluie, les eaux s’infiltrent et amènent les polluants en surface, ce qui fait augmenter la minéralisation totale des eaux souterraines.

La situation des autres points d’eaux non contaminés, se trouvant généralement dans les zones intermédiaires entre alluvions et zone d’aplatissement ou ligne de crête des reliefs, est assimilée à la figure 69 suivante. La nappe est en générale de type latéritique.

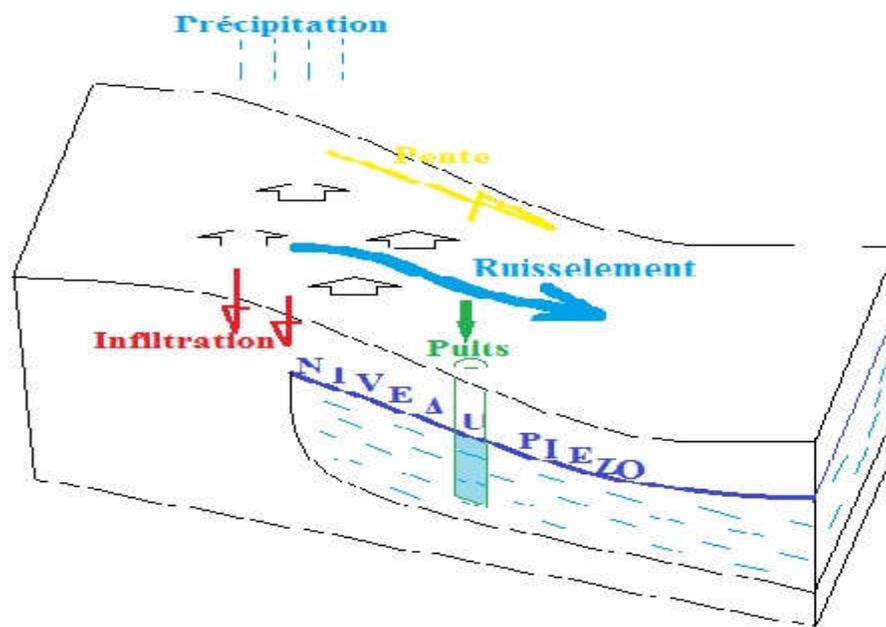


Figure 69 : Fonctionnement du mode de recharge de la nappe aquifère en zone intermédiaire

Les puits se trouvant dans les zones de relief (Partie Nord, Sud-Est et Nord-Est de la zone d’étude) se comportent comme le montre la figure 69. Les puits ne sont pas contaminés car les zones sont plus ou moins dégagées et les pentes sont assez suffisantes pour protéger la nappe aquifère de l’infiltration rapide des eaux de surface.

IV-1.4 INTERPRETATION DU CHIMISME DES EAUX

L’interprétation du chimisme des eaux a été faite en utilisant les diagrammes de Piper et de Schöeller-Berkalof. Le diagramme triangulaire Piper donne les faciès chimiques des eaux à partir des quantités en réaction exprimées en pourcent et le diagramme de Schöeller – Berkaloff, utilisant les concentrations des ions majeurs permet d’obtenir la qualité chimique des eaux (Demdoum A.et DjebbarM., 2009).

a) Faciès chimiques des eaux
- Diagramme de Piper

La représentation des teneurs en ions majeurs sur le diagramme de Piper dans les deux périodes d'échantillonnage est montrée sur la figure 70. Le changement du faciès chimique des eaux des puits (en R10, R13, R14, R22 et R23) ne signifie pas grand-chose ici sur la qualité chimique de ces eaux. Le changement est notable pendant le traitement sur le logiciel parce qu'il est évident qu'en passant par exemple de la concentration en calcium de 1,6 mg/L à 20 mg/L (une différence d'à peu près 8 fois), c'est normal qu'il y a une translation remarquable sur le faciès dans le diagramme de Piper (figure 70). Mais à l'échelle de la pollution de la ressource, une concentration de 20 mg/L de calcium est largement en dessous de la norme de potabilité de l'eau qui est à 250 mg/L.

La représentation des teneurs en ions majeurs sur le diagramme de Piper permet de distinguer quatre groupes d'eaux.

Pendant la période d'été, les eaux des puits R05, R07, R12, R15, R16, R17, R18, R19, R20 et R21 correspondent à des eaux de type chloruré calciques. Les eaux des puits R02, R06, R08, R09, R10 et R23 sont de type chloruré calcique et magnésiens. Les eaux des puits R01, R14, R22 et R24 sont de type bicarbonaté calciques et enfin les eaux des puits R03, R04, R11 et R13 sont de type chloruré sodique.

Pendant la saison de pluie, on a encore les quatre groupes d'eaux. Quatre échantillons parmi les 21 présentent un grand changement de faciès chimique. Ce sont les eaux des puits R10, R13, R22 et R23. On montre à la figure 71 que ces quatre eaux présentent un changement de faciès chimique.

Pour mieux comprendre la situation, nous avons capturé une image sur Google Earth de ces points d'eaux que nous présentons à la figure 72. Ces figures montrent plus clairement les scénarii possibles sur le lieu et permettent d'identifier les causes probables de ce changement de la caractéristique chimique de ces eaux.

Ces points d'eaux se trouvent en général dans la zone de vulnérabilité modérée à la zone de vulnérabilité haute d'après la carte de vulnérabilité de Rasolondrazao 2007. Le changement du faciès chimique au niveau de ces points d'eaux est causé par la variation de la concentration en cations (Na, Mg, Ca) ou en anions (Cl, NO₃, HCO₃).

Exemple : l'échantillon en R13 passe de chloruré sodique au chloruré calcique car la concentration en calcium a augmenté de 1,60 mg/L à l'été, à 20mg/L à la période de pluie et le sodium a diminué de 16,51mg/l à 8,24mg/L. La répartition spatiale de la variation des faciès chimiques des eaux des puits sur les deux périodes est présentée à la figure 73

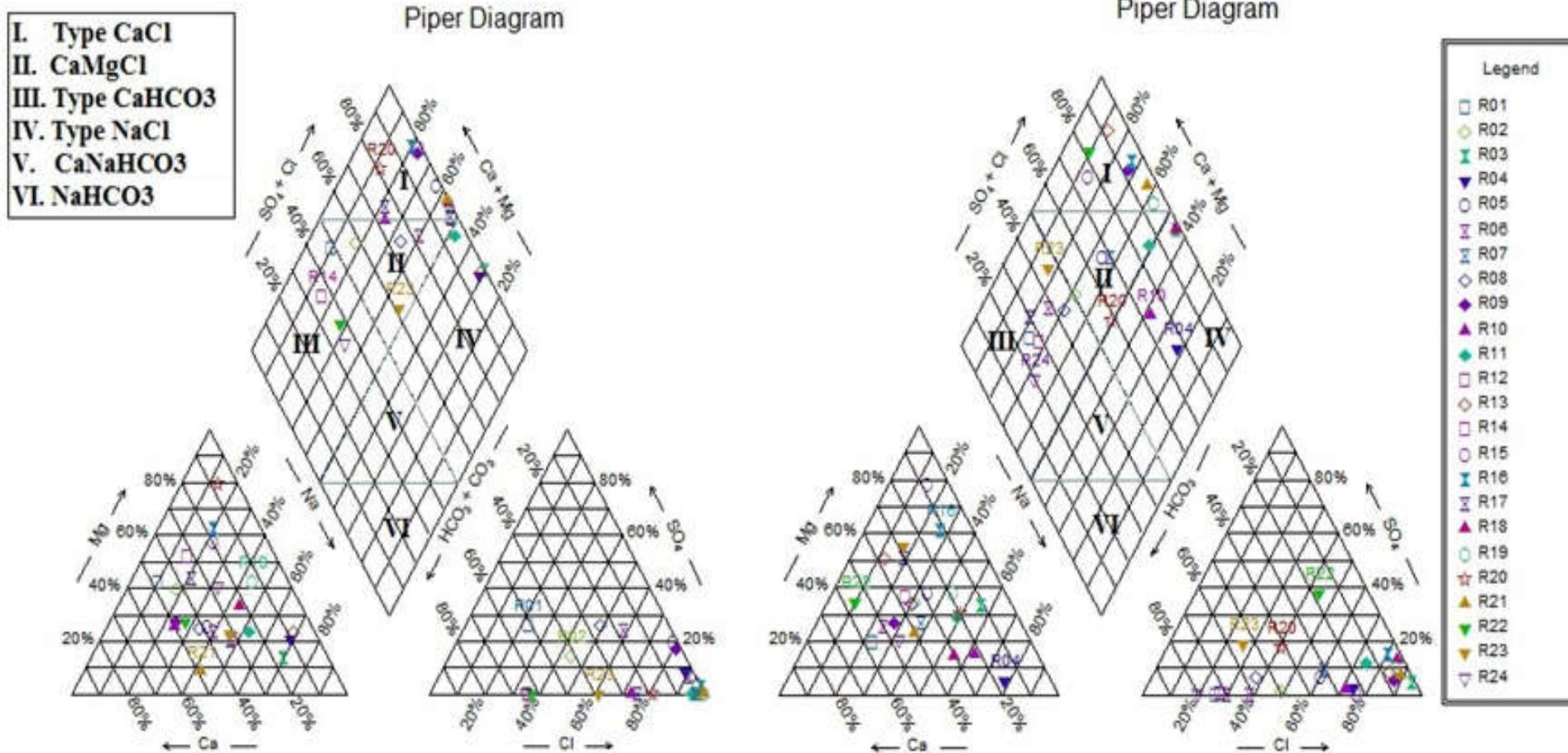


Figure 70 : Diagramme de Piper des eaux souterraines pendant les deux périodes d'observation (8A étiage en Octobre 2012, et 8B Pluie en Février 2013)
 Type des eaux : I- Chloruré calcique ; II- Chloruré calcique magnésien ; III- Bicarbonaté calcique ; IV- Chloruré sodique, V- Bicarbonaté calcique sodique ; VI- Bicarbonaté sodique

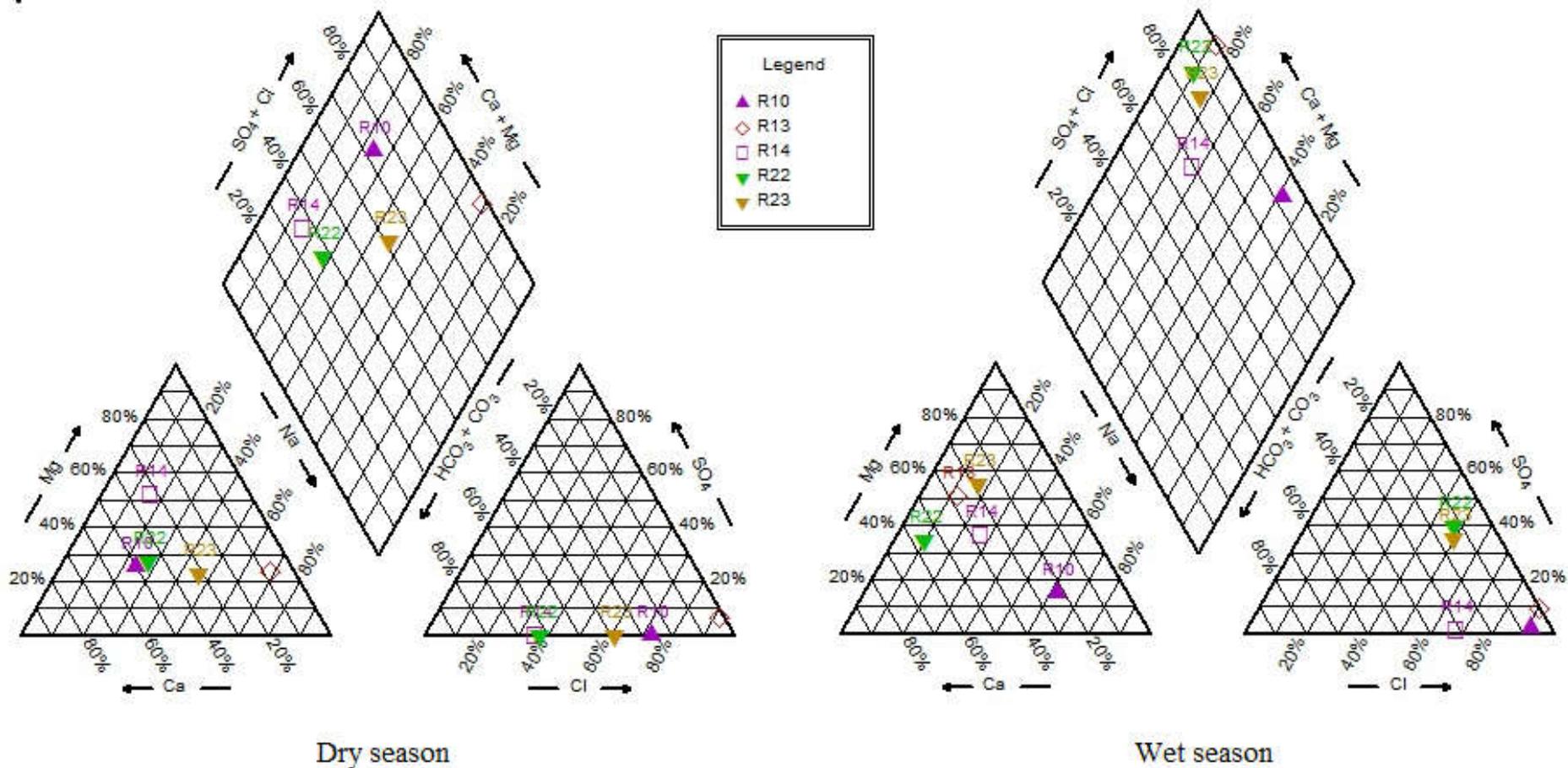
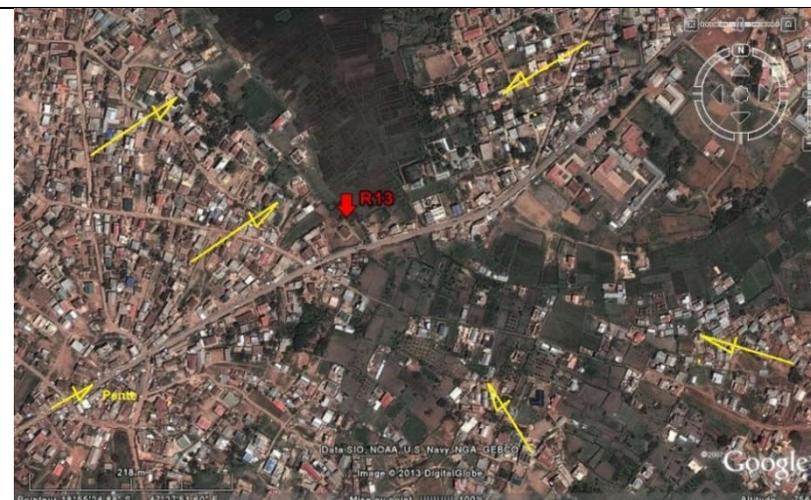


Figure 71 : Les eaux présentant un changement de faciès chimique



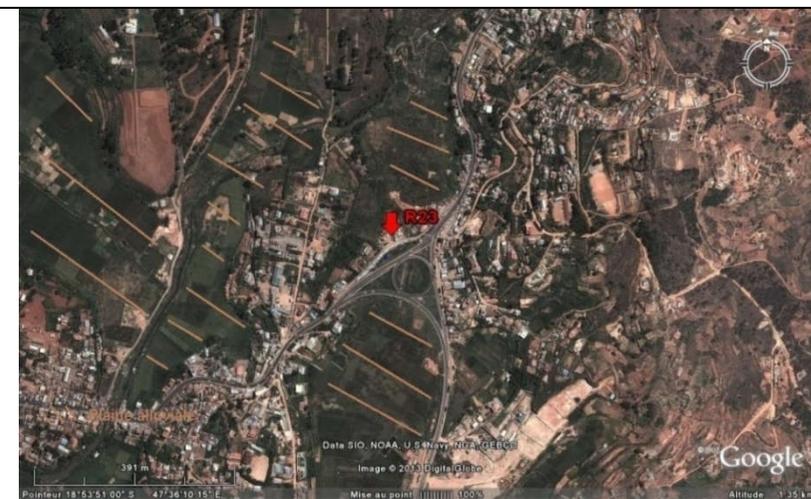
Point d'eau R10



Point d'eau R13



Point d'eau R22



Point d'eau R23

Figure 72 : Images des situations morphologiques capturées sur Google Earth. Puits R10, R13, R22 et R23

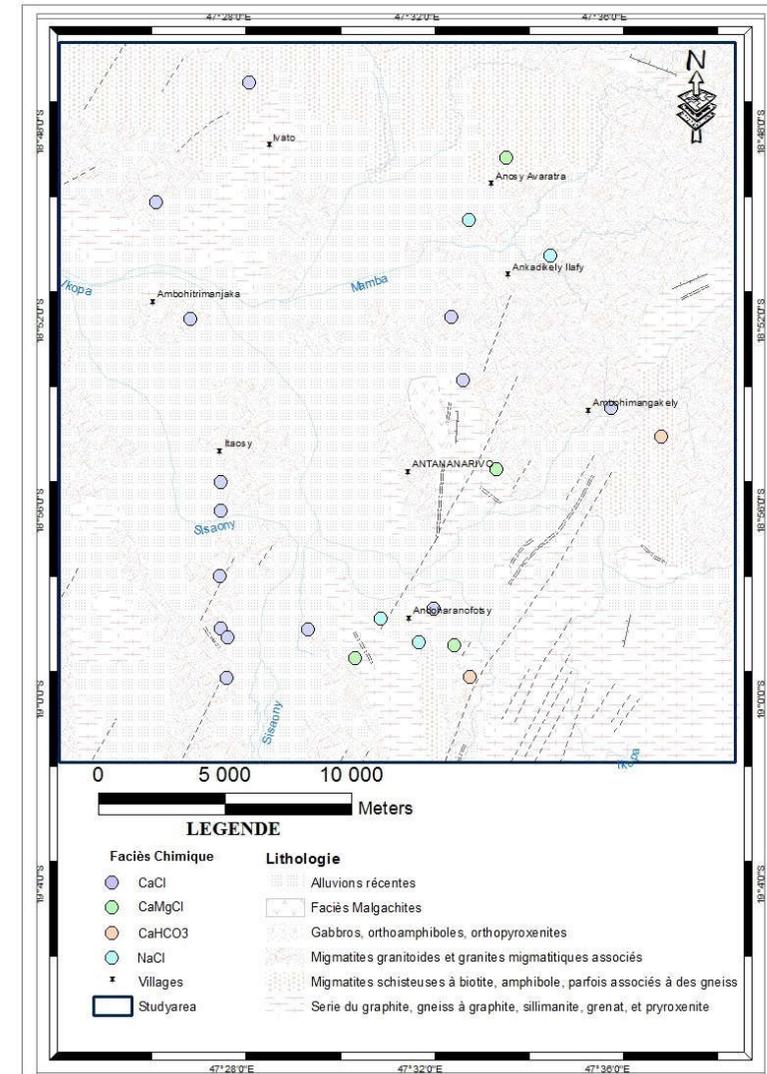
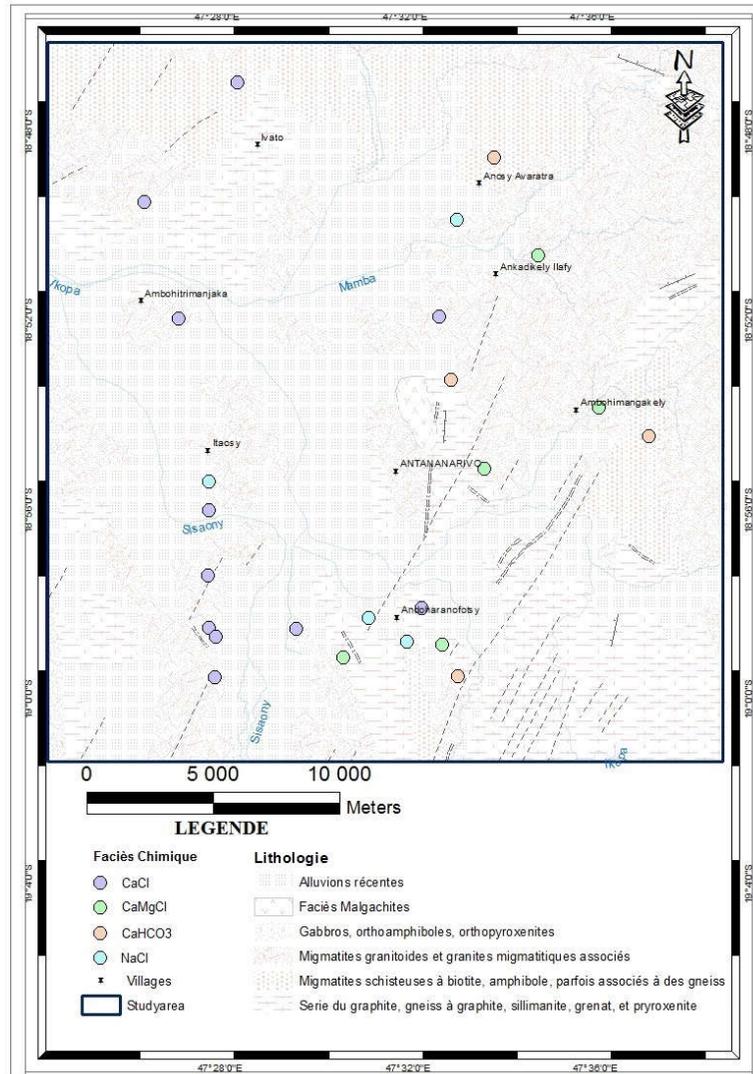


Figure 73 : Répartition des faciès chimiques des eaux des puits pour les deux saisons