

rappeler que le faciès sableux présente par des intercalations argileuses siège de ces phénomènes d'échange de base. L'influence indirecte de la mer apparaît dans la minéralisation des eaux de ces ouvrages. Ce sont les pluies chargées de sels marins qui leur confèrent ce faciès chloruré sodique acquiert précocement par la nappe.

Les échantillons Bad3b ; PIB1 ; P1-1 ; PIB3 ; PSQ1 sont caractérisés par une prédominance des ions Cl et Na<sup>+</sup> avec une minéralisation moyenne à élevée. Ces ouvrages localisés pour la plupart dans la tête de la Presqu'île où la nappe est captive montre un phénomène de mélange avec l'eau de mer associé à la dissolution des minéraux volcaniques. Les teneurs en Cl élevées marquent la minéralisation de la nappe l'avancée du biseau (influence directe) alors que l'importance des ions Mg<sup>2+</sup> traduit le phénomène de dissolution. Les ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont faibles dans ces ouvrages situés généralement sur le littoral.

Les échantillons des ouvrages PNbis ; F19 ; F17 ; F21 qui sont tous des forages ont des teneurs en TDS élevées associées à de fortes teneurs en nitrates dépassant parfois 500 mg/l. Cette forte minéralisation de ces forages (F17 ; F19 ; F22) résulte de la contamination de la nappe par les latrines dans la zone périurbaine. Dans cette zone la faible profondeur de la nappe favorise l'infiltration des eaux polluantes qui atteignent rapidement la nappe.

Les échantillons du champ 8 c'est à dire Bad3H ; PIB2 ; Front de Terre ; F19 ; P2-7 ; P3-3 ; Pt109 ; P2-3 sont caractérisés par un faciès chloruré calcique avec des teneurs de Ca<sup>2+</sup> et Na<sup>+</sup> sensiblement égales, ce qui montre un processus d'échange ionique. Dans les ouvrages Bad3 ; PIB2 ; Front de Terre, où les TDS sont élevés il existe un processus d'échange inverse. En effet lorsque la contamination des eaux souterraines par l'eau de mer est faible (moins de 15%), il y a un enrichissement en ion Na<sup>+</sup> et si le pourcentage de l'eau de mer augmente, l'eau de la nappe est de plus en plus enrichie en Ca<sup>2+</sup> et s'appauvrit en Na<sup>+</sup> (magaritz et Luzier, 1985). Le faciès initialement chloruré sodique devient chloruré calcique. La localisation de ces ouvrages en bordure de l'océan met en évidence l'avancée du biseau salé. L'observation du faciès permet de suivre l'évolution de la pollution des nappes par la mer dans les aquifères côtiers.

La minéralisation du puits Km5 localisé dans le champ 6 et du piézomètre Bad2H est contrôlée par le phénomène de dissolution lié à l'altération des couches basaltiques de couverture. On note une augmentation des ions Mg<sup>2+</sup> issus de cette altération.

Les piézomètres P3-1 et P3-2 localisés dans le champ 4 et P2-6 localisé dans le champ1, caractérisés par des TDS faibles sont soumis à un phénomène de dilution par les eaux de pluie. Les cartes piézométriques montrent un dôme centré sur P2-6. Cette zone de forte infiltration donc de recharge de la nappe.

Le diagramme de Durov a permis de voir que la minéralisation de la nappe obéit à la position géographique de la zone (environnement côtier) et à la nature de l'aquifère (libre et de faible profondeur à l'Est et captif et infrabasaltique à l'Ouest). La minéralisation est en plus de l'influence marine contrôlée par les phénomènes de dissolution, de dilution, de concentration et d'échange de base. Les pluies qui prennent

naissance dans cet environnement se chargent en sels marins qui leur confèrent un faciès chloruré sodique.

La nappe dont l'alimentation se fait à partir des eaux de pluie acquiert précocement ce faciès en s'enrichissant en ions chlorures et sodium. Cette influence indirecte de la mer sur la minéralisation est plus marquée dans la nappe libre où les profondeurs sont faibles. Les droites de corrélation (fig 18) présentent un bon coefficient entre les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  d'une part et entre ces deux ions et la minéralisation d'autre part, ce qui montre l'origine commune des deux ions essentiellement marine et leur influence dans la minéralisation de la nappe.

L'ion  $\text{Na}^+$  provient également des phénomènes d'échange de bases au niveau des argiles présentes dans les horizons sableux.

Par ailleurs l'influence directe de mer sur la minéralisation est marquée par l'enrichissement des eaux en contact avec le front salé en ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Cl}^-$ . Ce phénomène affecte surtout les ouvrages situés en bordure de mer. Il se produit un phénomène d'échange inverse entre l'eau de la nappe et les eaux de mer.

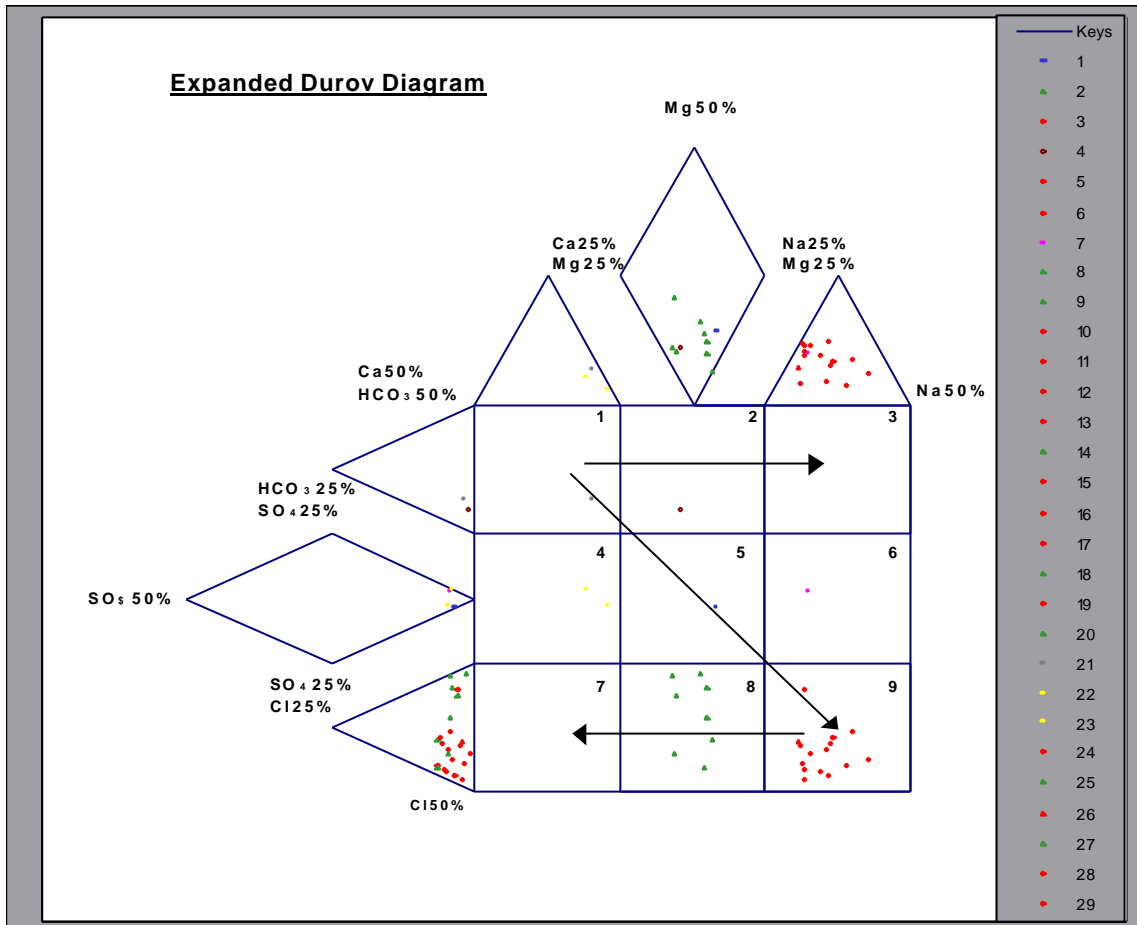
Les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  proviennent essentiellement des eaux de pluie dont ils constituent l'ion dominant après le sodium.

Le faciès bicarbonaté calcique observé dans la zone du dôme et au Sud-est de la nappe captive est lié soit à la dissolution du  $\text{CO}_2$  atmosphérique (P2-6) ou à une remontée du mur carbonaté (PIB1).

Les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$  proviennent essentiellement de la dissolution des minéraux des roches basaltiques de la partie captive. Les teneurs en ions  $\text{Mg}^{2+}$  sont d'ailleurs plus élevées au niveau de la tête de la Presqu'île que dans la zone périurbaine à nappe libre.

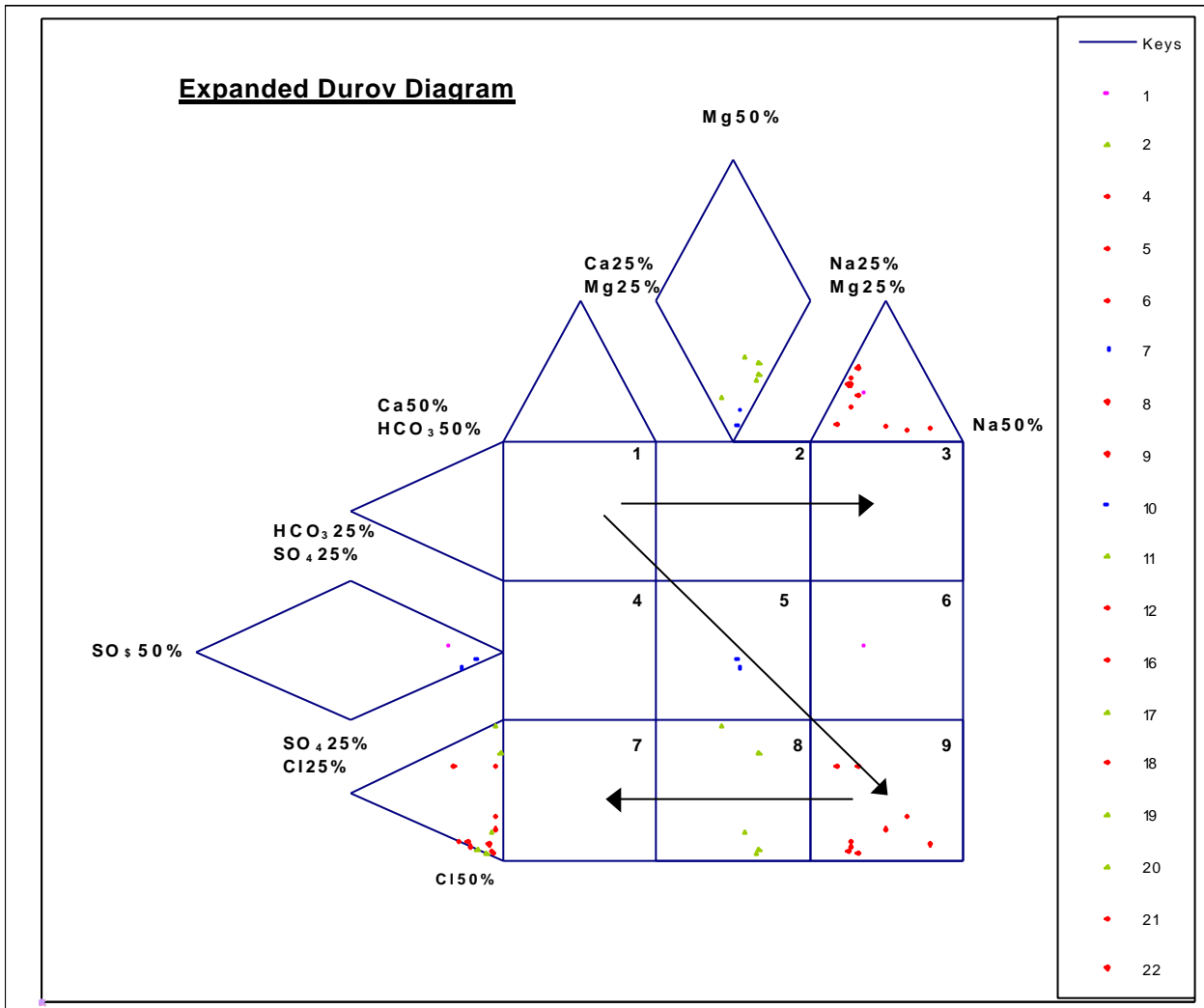
Les ions  $\text{NO}_3^-$  qui en général sont faibles dans les nappes présentent des teneurs élevées dans la nappe qui est le siège d'une pollution anthropique. Dans la zone périurbaine cette pollution a tendance à se généraliser.

La nappe subit par ailleurs pendant la saison sèche des phénomènes d'évaporation qui se traduisent par la concentrations des éléments. Ce phénomène est d'autant plus important que la profondeur est faible n'excédant pas 10 m. Elle est donc très marquée dans la partie libre (Zone Est) où la nappe est superficielle.



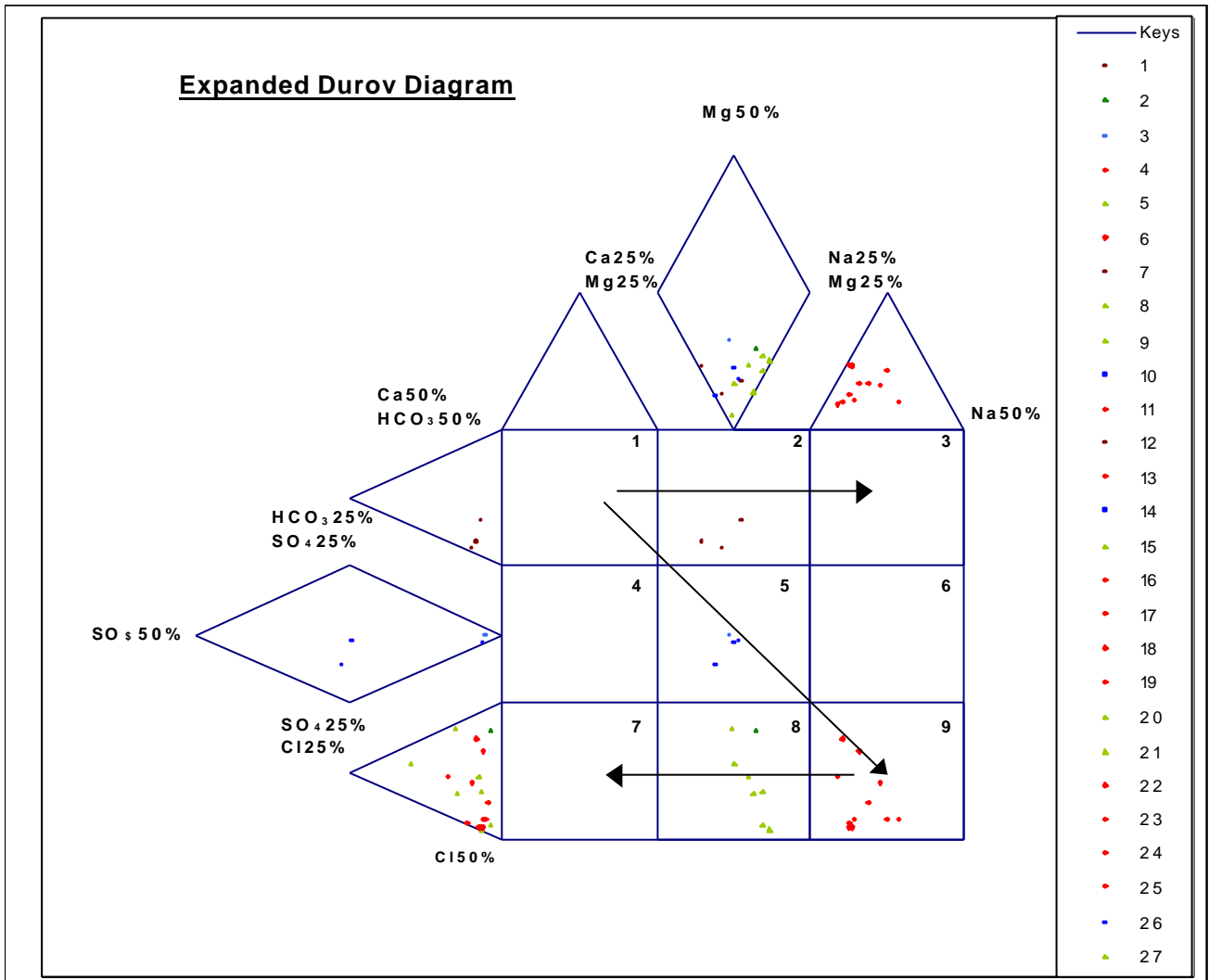
1 = Bad 2H ; 2 = Bad 3H ; 3 = Bad 3B ; 4 = Bad 4 ; 5 = PIB 1 ; 6 = P1-1 ; 7 = Km 5 ; 8 = PIB 2 ;  
 9 = Front de Terre ; 10 = PN bis ; 11 = Bad 6 ; 12 = PIB 3 ; 13 = P2-1 ; 14 = P2-3 ; 15 = P2-5 ;  
 16 = F22 ; 17 = F17 ; 18 = F19 ; 19 = F21 ; 20 = P2-7 ; 21 = P2-6 ; 22 = P3-1 ; 23 = P3-2 ;  
 24 = Mbeub ; 25 = P19 ; 26 = PSQ1 ; 27 = P2-8 ; 28 = P2-2

Figure 17 a : Diagramme de Durov des eaux de la nappe de Dakar (octobre 2001)



1 = Km 5; 2 = Bad 2H; 4 = P2-2; 5 = P2-3; 6 = P2-5; 7 = P2-6; 8 = P2-7; 9 = P2-8;  
 10 = P3-1; 11 = P3-2; 12 = P3-4; 16 = PN bis; 17 = Front de Terre; 18 = F17; 19 = F19;  
 20 = F21; 21 = F22; 22 = Mbeub

Figure 17 b : Diagramme de Durov des eaux de la nappe de Dakar (juillet 2003)



1 = Km 5 ; 2 = Bad 2H ; 3 = Bad 4 ; 4 = P2-2 ; 5 = P2-3 ; 6 = P2-5 ; 7 = P2-6 ; 8 = P2-7 ;  
 9 = P2-8 ; 10 = P2-9 ; 11 = P2-10 ; 12 = P3-1 ; 13 = P3-2 ; 14 = P3-4 ; 15 = PIB1 ; 16 = PIB2 ;  
 17 = PIB3 ; 18 = PN bis ; 19 = Front de Terre ; 20 = F.Autoroute ; 21 = F17 ; 22 = F19 ;  
 23 = F21 ; 24 = F22 ; 25 = Mbeub ; 26 = Pt68 ; 27 = Pt109

Figure 17 c : Diagramme de Durov des eaux de la nappe de Dakar (juillet 2004)

### 3. Etude de la pollution azotée

L'étude de la pollution a été réalisée à partir de la variation spatio-temporelle des teneurs en nitrates qui constituent un bon indicateur de pollution d'origine organique. Cet ion qui est en général est faiblement représenté dans les eaux souterraines provient de la minéralisation de l'azote organique (par oxydation) en passant par des étapes intermédiaires (ammonium, nitrites).

#### 3.1. Evolution spatiale

L'ion nitrate qui représente le degré d'oxydation le plus élevé dans le cycle de l'azote varie dans la nappe entre 0,55 et 616,74 mg/l en juillet 2003, entre 5,28 et 790,5 mg/l en juillet 2004 et entre 54,17 et 810,40 mg/l en octobre 2004.

Les cartes d'évolution (Fig 18 a, b et c) montrent présentent une répartition spatiale des ions  $\text{NO}_3^-$  identiques avec trois zones bien distinctes :

A l'Ouest au niveau de la tête de la Presqu'île les teneurs sont moyennes devenant fortes aux forages PNbis et Front de Terre. Dans cette zone la nappe est maintenue captive par les formations basaltiques qui assurent selon son épaisseur et le degré de fissuration sa protection. Les valeurs tournent en moyenne autour de 30 mg/l.

Au niveau des forages PNbis et Front de Terre les fortes teneurs de la nappe sont dues à la faible épaisseur de la couverture basaltique favorisant une contamination verticale de la nappe. Il a été mis en évidence une alimentation à partir de la nappe suprabasaltique. En plus de la contamination latérale à partir de la zone périurbaine ce mécanisme explique la forte minéralisation observée au forage PNbis.

Dans la zone périurbaine densément habitée (Pikine, Thiaroye) les teneurs en nitrates dépassent largement la norme de 50 mg/l définie par l'OMS. Les concentrations maximales sont rencontrées dans la zone de captage de Thiaroye regroupant les forages F17, F19, F21 et F22.

La pollution azotée localisée déjà mise en évidence est en étroite liaison avec la quasi absence de systèmes d'évacuation des déchets liquides et solides. En effet, ce sont les flux horizontaux liquides provenant des latrines traditionnelles (système d'assainissement individuel non étanche) et le lessivage des ordures ménagères mal conditionnées qui sont à l'origine de la contamination de la nappe sous couvert sableux et de faible profondeur.

Dans la zone non habitée située à l'Est de Thiaroye les teneurs en nitrates sont inférieures à 50 mg/l. Cette zone correspond aux Niayes qui sont des zones de cultures maraîchères. L'observation des faibles teneurs en  $\text{NO}_3^-$  dans cette zone comparées aux concentrations élevées de Thiaroye, met en évidence l'origine domestique de la pollution. Cette pollution anthropique est en étroite liaison avec la quasi absence de système d'assainissement pour l'évacuation des déchets solides et liquides. Ce sont en effet les flux horizontaux provenant des latrines traditionnelles (système d'assainissement individuel non étanche) et le lessivage des ordures ménagères mal conditionnées qui sont à l'origine de la contamination de la nappe libre de faible profondeur.

L'étude de la corrélation entre les nitrates et les chlorures trouvées dans les nappes infrabasaltique et libre montre un faible coefficient ( $R^2 = 0,04$ ) dû au fait que les ions Cl ont une origine essentiellement marine. Cependant il a été observé dans tous les ouvrages fortement pollués par les nitrates, des teneurs en chlorures élevées. Ceci

permet de confirmer l'origine organique de la pollution azotée car les ions Cl accompagnent les ions nitrates dans le cas d'une pollution par les latrines.

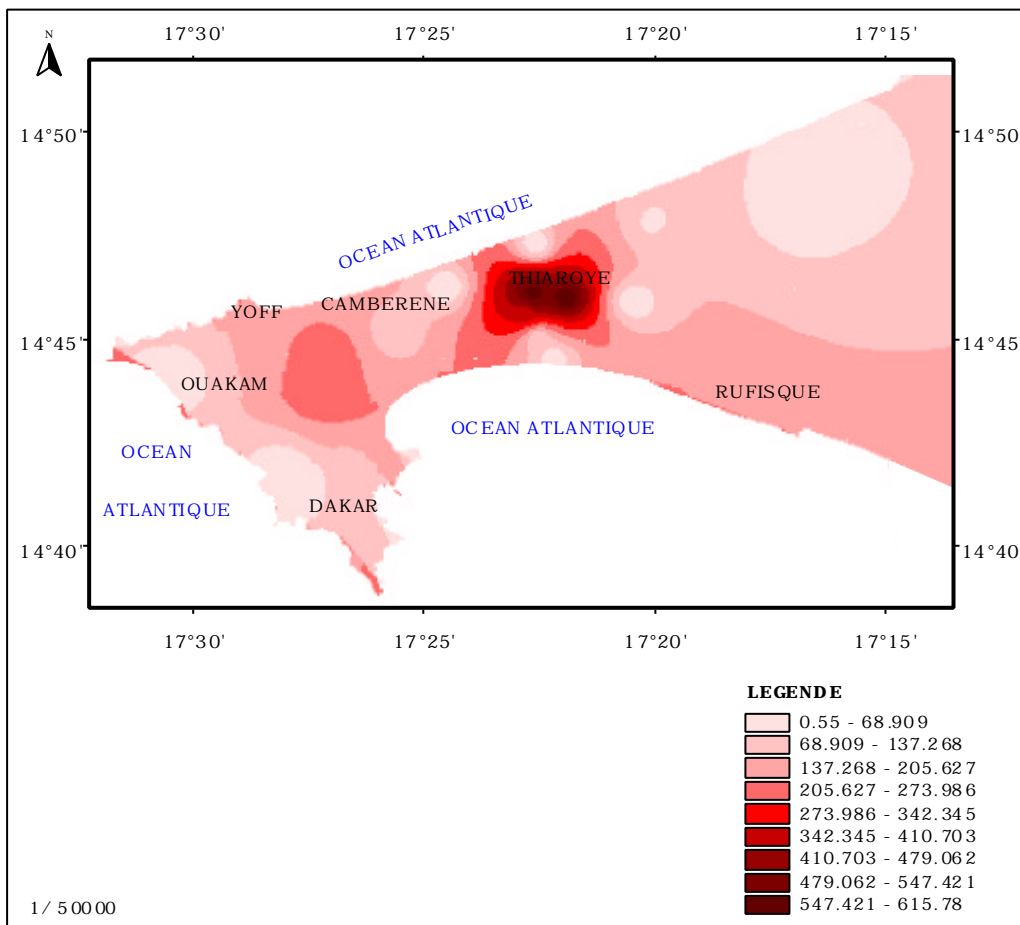
La corrélation entre les teneurs en nitrates et la profondeur des nappes n'est pas bien établie mais dans la zone où la nappe est subaffleurante, l'évaporation peut être un facteur jouant dans la concentration de cet élément.

Par ailleurs les sédiments de la zone non saturée avec une humidité pondérale moyenne de 3% de sol, jouent un rôle de réservoir à  $\text{NO}_3^-$  pouvant être remobilisés lors de l'infiltration des eaux de pluie. Ce qui complique la situation car la contamination sera longtemps entretenue même après un arrêt des rejets des déchets organiques.

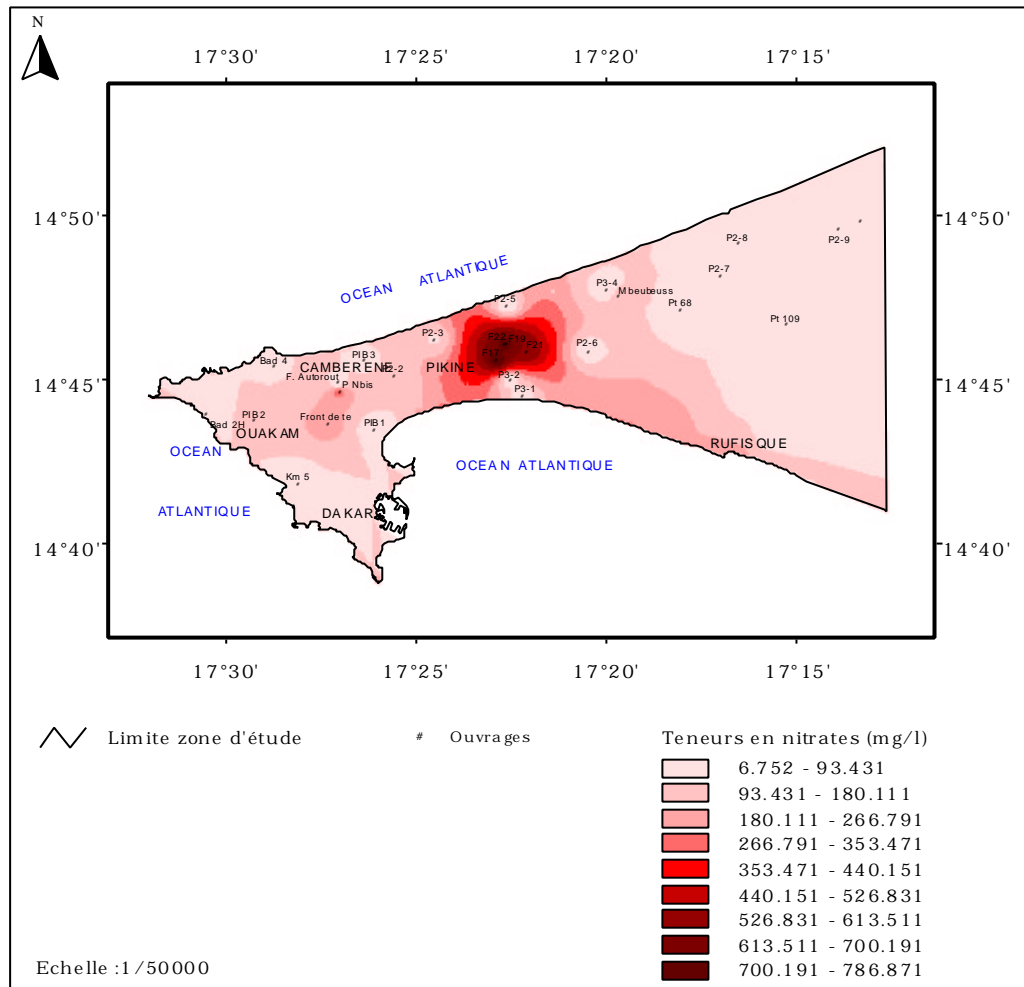
Il a été également constaté que l'ensemble des forages étudiés est fortement atteint par la pollution azotée contrairement aux piézomètres. Au niveau des forages le pompage de la nappe favorise un appel important d'eau et donc amplifie la concentration des nitrates autour du rayon d'influence. Les cartes piézométriques montrent cet écoulement convergent avec un cône de dépression autour des forages PNbis et Front de Terre.

Le degré de contamination des forages perturbe la distribution car la Société Des Eaux (SDE) effectue une dilution des eaux polluées pour diminuer les teneurs en nitrates avant la distribution.

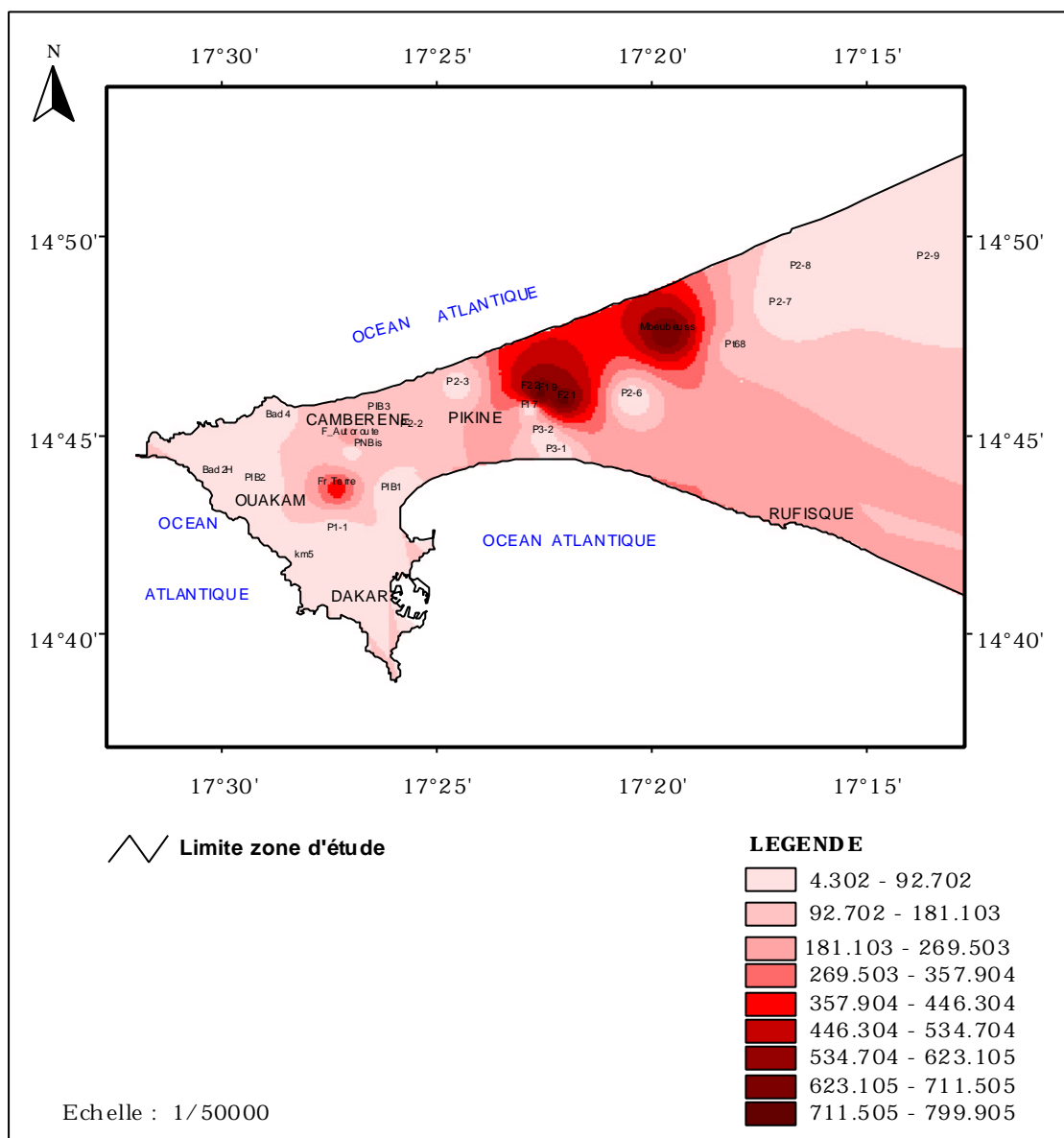
Les populations utilisant directement l'eau des puits sont confrontées à des risques sanitaires (infections hydriques).



(a)



(b)



(c)

Figure 18 : évolution spatiale des nitrates (mg/l) dans la nappe de Dakar ((a) juillet 2003 ; (b) juillet 2004 ; (c) octobre 2004))

## 3.2. Variation temporelle

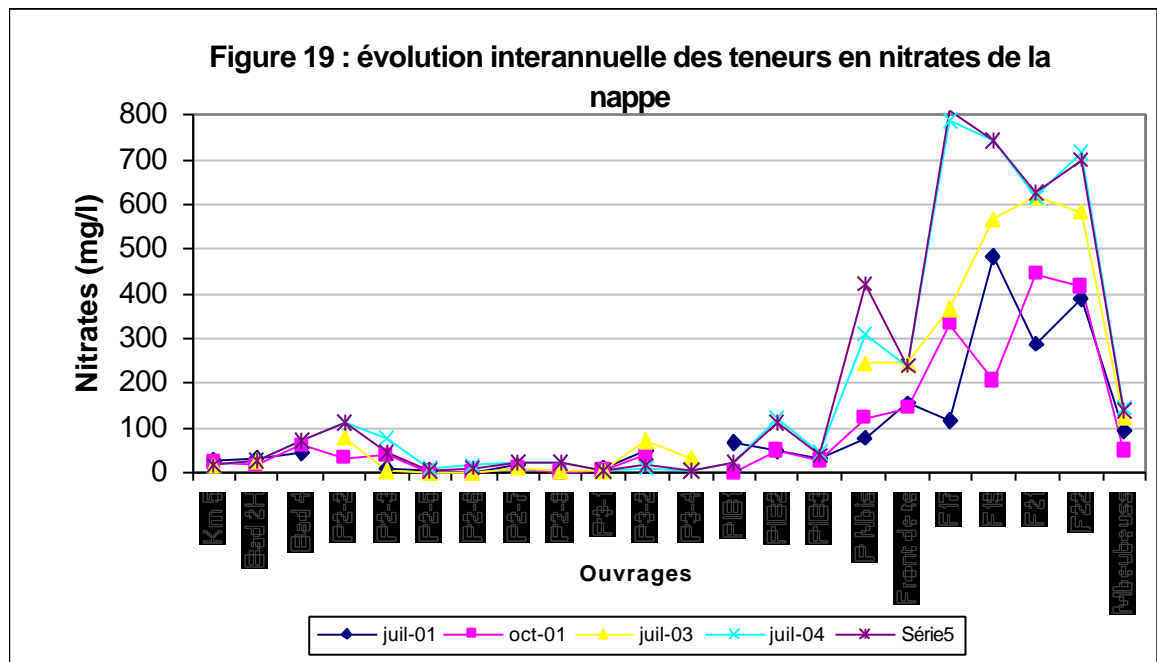
### 3.2.1 Variation interannuelle

Dans les zones très polluées les teneurs en nitrates ont nettement augmenté au cours des deux dernières années (Fig 19). C'est le cas de tous les forages échantillonnés aussi bien dans la zone de captage de Thiaroye (F17, F19, F21, F22) que dans la nappe infrabasaltique (PN Bis, Front de Terre). Par exemple les teneurs en nitrates ont passé en trois ans de 117,4 mg/l (juillet 2001) à 790,5 mg/l (juillet 2004) et de 333,7 mg/l (octobre 2001) à 810,4 mg/l (octobre 2004) dans le forage de F19. Cette situation est

d'autant plus alarmante que la pollution est entretenue et pourrait encore évoluer. L'utilisation de ces forages dans l'alimentation de la ville de Dakar et environs pourrait être remise en question si la pollution de la nappe suit ce rythme d'évolution.

Par contre dans les zones non ou peu polluées, les teneurs varient légèrement d'une année à l'autre. Il s'agit des ouvrages de la nappe infrabasaltique (Km5, Bad 2H) et certains ouvrages de la de la nappe libre (P2-8, P2-7, P2-5, P2-6, P3-1) Ces ouvrages sont éloignés situés sur le littoral et ne subissent une forte pression anthropique. Dans les piézomètres P3-2 et P3-4 situés dans des champs les nitrates ont connu une certaine baisse ces dernières années.

Par ailleurs la variation au cours de la saison des pluies est très faible avec une légère augmentation au mois d'octobre.



### 3.2.2 Suivi hebdomadaire des nitrates

L'évolution spatio-temporelle (Fig 20) des nitrates peut également être appréciée à partir d'observations hebdomadaires sur quatre ouvrages. Les observations ont été faites d'octobre 2003 à mars 2004. Bien que le suivi ne soit pas continu sur une année il nous a permis de voir l'évolution des nitrates sur un pas d'observation plus réduit.

Ainsi on note une augmentation brusque des nitrates dans le forage F19, augmentation déjà révélée par l'évolution inter annuelle. En effet un pic de nitrates est observé juste après la fin de l'hivernage marquant l'arrivée d'une première vague d'eau chargée en nitrates. L'autre pic débute au mois de décembre et persiste de jusqu'au mois de mars. Ces concentrations beaucoup plus élevées que celles observées au mois d'octobre sont dues à l'arrivée tardive d'eaux très polluées. Il faut que signaler que dans la zone du forage F19 la nappe libre et de faible profondeur d'environ 6 m réagit assez facilement à la pollution de surface. De plus les latrines presque noyées dans la nappe déversent dans la nappe des eaux très chargées en nitrates et ceci en liaison aux débits de pompages.