

SENEGAL

ZONE D'ETUDE

Caractéristiques : La climatologie de la zone intertropicale est caractérisée par une dynamique complexe liée à des transferts énergétiques qui sont essentiellement contrôlés par les centres d'action de Sainte Hélène (Atlantique sud), des Açores (Atlantique nord) et celui de la zone saharo-libyenne (Nord-Est africain). Les deux centres d'action de Sainte Hélène et des Açores aboutissent à la convergence de deux masses d'air que sont l'harmattan (alizé continental et sec) au nord et la mousson (alizé maritime humide) au sud dont l'épaisseur maximum est d'environ 3000m. Le contact au sol de la mousson et de l'alizé continental constitue le front inter-tropical (FIT) qui est très fluctuant au cours de l'année. Sa surface frontale est très inclinée vers le sud de sorte qu'elle évolue sous l'harmattan. Le FIT se déplace entre les 20^{ème} et 4^{ème} parallèle nord qu'il atteint respectivement en juillet et en janvier. Dans la frange sahélienne, ce sont les différentes positions du FIT qui sont à l'origine des saisons sèches et humides . Au Sénégal le climat est de type tropical subdésertique ponctué par des étés humides et des hivers secs. Par contre, la région de DAKAR qui a une position avancée dans l'atlantique, est caractérisée par un microclimat de type côtier. Celui-ci est fortement influencé par les alizés maritimes et la mousson qui s'établissent respectivement de novembre à juin et de juillet à octobre suivant des directions N-NW et S-SE .

Les Précipitations : Les précipitations de la saison des pluies sont générées par la mousson qui provient de l'alizé issu de l'anticyclone de Sainte Hélène. Celle-ci se charge d'humidité et atteint le Sénégal selon le sens Nord-Est dès le mois d'Avril. La durée, l'intensité et la répartition saisonnière des pluies en un endroit donné varient considérablement d'une année à l'autre, en particulier dans les régions où les pluies sont les moins abondantes. Du sud au nord, la durée moyenne de la saison des pluies est respectivement de 5 à 3 mois, induisant un gradient latitudinal auquel se surimpose un gradient Est-Ouest avec des pluies qui sont plus abondantes sur la côte qu'à l'intérieur. Dans la région de Dakar, les hauteurs annuelles des pluies sont actuellement situées entre 500 et 600mm et les fréquences des hauteurs de pluies journalières moyennes de la période 1921 à 1989 montrent que la quasi-totalité des précipitations se situe entre 0,1 et 50mm. Le cœur de la saison des pluies se situe aux mois d'Août à Septembre avec respectivement des maxima de 493mm et 365mm, la saison sèche se situant entre les mois d'Octobre à Novembre aux mois de Mai à Juin.

*Tableau de Caractérisation des pluies mensuelles
à Dakar (Données de la météorologie nationale;1921-1988)*

Maximum = valeur la plus élevée ; Moyenne = valeur moyenne ; Médiane = valeur dépassée ou égalee dans 50% des cas ; Quartile supérieur = valeur égalee ou dépassée 25% des cas) ; Quartile inférieur = valeur dépassée ou égalee dans 75% des cas.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Maximum	51	12	0,2	0,2	16	80	272	493	365	250	120	9
Quartile supérieur	0	0	0	0	0	13	105	258	220	53	0	0
Moyenne	2	1	0	0	1	10	81	193	152	47	3	0
Médiane	0	0	0	0	0	5	72	170	143	18	0	0
Quartile inférieur	0	0	0	0	0	2	34	115	71	6	0	0

La Températures, l'humidité relative, l'évaporation et l'évapotranspiration : La température moyenne annuelle calculée sur la période 1971-1988 est de 24°C. Cette température qui est inférieure à celle de la zone nord (29°C) est fortement influencée par l'effet de la mer. L'influence maritime entraîne, par rapport au reste du pays une faible différence de régime saisonnier marqué par une période chaude qui va de mars à octobre et une période froide allant de novembre à février. Les variations de l'humidité relative dépendent en partie de la température de l'air et des caractéristiques hygrométriques des masses d'air. L'évolution annuelle de l'humidité relative de l'air est aussi tempérée par l'influence maritime et la moyenne annuelle se situe autour de 70%. Les valeurs les plus élevées coïncident avec le coeur de la saison des pluies et les faibles aux mois d'Avril-Mai et Octobre à Décembre-Janvier. L'évaporation et l'évapotranspiration correspondent à des phénomènes de perte de l'eau sous forme de vapeur. Elles dépendent de phénomènes physique et physiologique. Les valeurs de l'évaporation Piche oscillent entre 90mm en Septembre et 120mm en Décembre-Janvier et celles de l'évapotranspiration Turc évoluent entre 141mm (Septembre) et 173mm (Avril-Mai). L'évaporation Piche annuelle s'élève à 1500mm alors que celle de l'EPT Turc annuelle est autour de 1830mm.

La radiation et l'insolation : La radiation et l'insolation sont des paramètres qui peuvent servir, entre autres, dans la quantification des phénomènes de l'évapotranspiration. La radiation est exprimée en cal/cm²/j alors que l'insolation est exprimée en heures et minutes. Les fortes valeurs de radiation et d'insolation correspondent à des températures très élevées et les faibles valeurs à des températures basses et inversement. Sur la période de 1980 à 1997, l'insolation moyenne varie de 7,1 h/j pendant la saison pluvieuse où le ciel est toujours nuageux à 8,8 h/j pendant la saison sèche où le ciel est bien dégagé. Quant à la radiation, la valeur moyenne mensuelle la plus élevée est de 2462 J/cm² et se situe dans la période allant de Mars à Juin, alors que la plus faible est de 1340 J/cm² correspondant aux mois de Juillet à Février.

Tableau de Caractérisation de l'insolation moyenne mensuelle (heures/jour) à Dakar sur la période de 1980 à 1997 (données météorologiques nationale)

A/m	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1980	9.3	8.7	9.5	9.9	10.3	8.0	7.4	7.1	7.1	8.8	8.5	6.7
1981	5.5	7.4	9.5	9.1	8.1	9.1	6.6	7.7	7.3	8.6	8.0	6.7
1982	8.6	7.6	8.6	9.3	8.1	7.6	8.0	5.8	7.1	7.7	6.8	6.2
1983	6.3	9.0	7.6	8.1	6.2	6.7	8.1	7.4	7.8	8.6	8.6	7.2
1984	7.5	7.8	9.3	9.2	8.6	7.4	7.6	8.5	7.4	7.7	8.7	6.1
1985	6.0	6.0	7.6	9.2	9.9	8.3	6.8	7.0	6.5	8.2	8.2	6.0
1986	6.0	9.2	8.8	8.3	8.0	7.5	7.2	6.5	6.7	8.7	6.8	5.6
1987	7.9	8.3	9.5	6.8	6.3	7.9	7.4	6.8	6.2	6.8	8.3	8.9
1988	7.5	5.9	9.3	9.4	9.5	8.1	6.6	6.9	7.0	9.2	9.1	7.2
1989	7.6	6.5	8.4	9.6	9.0	7.2	6.9	6.7	7.5	7.8	6.6	8.2
1990	5.7	8.0	7.0	8.9	10.1	8.1	7.3	7.5	8.2	7.6	7.6	8.9
1991	4.9	8.4	9.6	9.9	8.4	6.7	6.2	7.0	6.3	8.0	7.7	5.8
1992	7.3	8.0	7.9	8.2	6.8	7.5	7.4	7.3	6.8	8.7	6.1	7.9
1993	5.6	8.1	9.0	9.0	8.6	7.9	6.8	7.7	7.3	7.6	8.0	7.6
1994	7.8	8.6	8.5	8.3	8.7	8.1	7.3	5.1	7.3	9.1	7.6	7.3
1995	8.0	7.6	9.8	10.6	10.1	9.1	7.6	6.8	7.2	8.5	8.8	6.9
1996	10.0	9.5	8.1	10.0	9.3	7.6	6.7	7.6	8.3	8.6	7.5	4.2
1997	7.6	7.6	7.8	10.7	7.2	6.3	8.0	7.3	6.6	8.7	7.9	6.6
Moy.	7.1	7.9	8.6	9.1	8.5	7.3	7.2	7.0	7.1	8.2	7.8	6.8

Les vents : Le régime des vents est caractérisé par une variation saisonnière des directions dominantes avec des vents du nord ou alizés (Novembre à Mai) et des vents du nord-est ou harmattan. A partir de la période Avril-Mai, c'est le vent de mousson qui s'installe. Les vitesses moyennes mensuelles évoluent entre 2,9m/s pendant le mois de septembre et 5,3m/s pendant le mois de Mars.

Tableau de caractérisation de la Vitesse moyenne des vents (m/s) à Dakar sur la période 1980 à 1997 (Données de la météorologie nationale)

A/m	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1980	4.5	5.1	6.1	5.8	5.4	3.7	3.7	3.2	2.2	3.6	4.8	5.6
1981	4.9	5.6	5.2	5.0	4.1	3.6	3.5	3.2	3.3	4.2	3.7	4.6
1982	4.7	4.9	5.1	5.3	5.1	3.6	3.3	3.1	2.8	3.7	4.5	5.1
1983	4.4	5.1	4.1	4.7	3.7	3.2	3.4	2.9	3.0	2.8	4.4	5.6
1984	5.4	3.9	4.9	5.4	4.3	2.9	2.9	2.5	2.6	2.4	4.8	4.4
1985	4.5	4.8	6.8	7.1	6.8	3.7	3.3	2.7	3.8	3.4	4.5	5.3
1986	5.2	5.4	6.2	5.3	4.5	4.9	4.2	3.8	2.9	3.7	5.0	5.2
1987	4.8	4.6	4.5	3.9	3.9	3.3	3.4	3.3	2.9	3.7	4.2	5.6
1988	5.7	5.0	4.4	5.3	4.8	4.2	3.9	3.3	3.4	3.3	4.5	4.7
1989	4.7	5.1	5.5	5.5	4.3	3.7	3.0	3.7	3.4	4.2	5.1	5.6
1990	5.7	5.0	5.4	6.7	5.5	4.7	4.4	4.0	3.7	3.9	6.3	6.8
1991	6.0	6.7	7.0	6.3	6.2	4.5	4.2	3.8	3.3	4.9	6.0	5.6
1992	6.4	6.9	5.9	7.5	5.3	3.4	2.8	2.9	2.2	3.6	4.0	5.1

1993	4.3	4.9	4.7	4.9	5.0	3.2	2.9	2.7	2.6	3.3	4.4	4.2
1994	4.6	4.2	4.6	4.4	3.7	2.8	2.9	2.5	2.5	3.0	3.3	4.4
1995	4.4	4.3	4.4	4.6	4.1	4.1	3.9	3.5	2.5	3.1	3.6	4.5
1996	4.9	5.2	5.5	5.6	6.0	4.1	3.5	3.4	3.4	3.1	4.1	5.5
1997	5.2	4.4	5.4	5.3	3.9	2.8	3.1	3.0	2.3	3.2	3.4	4.0
Moy.	5.0	4.8	5.3	5.4	4.8	3.6	3.4	3.1	2.9	3.5	4.4	5.1

Faciès géochimiques de la nappe : Par rapport aux précipitations dont elles sont issues, les eaux de la nappe montrent un enrichissement en ions majeurs dû très probablement au contact des formations superficielles sur lesquelles se déposent les sels issus des embruns marins. Les faciès chimiques sont donc acquis précocement lors de la percolation dans la zone non saturée du sol. Le faciès des eaux de la nappe est dans l'ensemble classé chloruré sodique avec une forte tendance vers les pôles nitrates. Ce faciès devient très souvent chloruré calcique à l'Est en raison probablement, de l'influence du substratum marno-calcaire qui est peu profond dans cette partie.

Tableau de comparaison entre la composition chimique des eaux de pluie dans la région de Dakar (Travi et al, 1987) et de la nappe phréatique de la zone périurbaine (Tandia,2000)

Eléments chimiques (moyenne ; mg/l)	Station	Pluies	Nappe phréatique périurbaine
Sodium Na ⁺	Dakar	3,36	104,0
Potassium K ⁺	..	0,57	31,2
Calcium Ca ²⁺	..	1,70	71,5
Magnésium Mg ²⁺	..	0,39	28,5
Sulfates SO ₄ ²⁻	..	2,42	72,5
Nitrates NO ₃ ⁻	..	0,07	190,4
Bicarbonates HCO ₃ ⁻	St-Louis	2,21	136,7
Chlorures Cl ⁻	..	2,26	153,2

Le profil des ions magnésium (Mg²⁺) : L'évolution des teneurs en Mg²⁺ montrent que les plus fortes teneurs sont localisées à la tête de la presqu'île (60mg/l) (1 = Bad 2) et dans la zone du lac Retba (10 = P69) où elles oscillent autour de 57mg/l. Hormis les zones de bordure de mer et du lac Retba, les teneurs en Mg²⁺ sont au dessous de la concentration maximale admissible de 50mg/l pour la consommation humaine. Les échantillons d'eau de la nappe sont répartis au voisinage d'une droite de dilution théorique entre l'eau de mer et l'eau de pluie. Les échantillons situés le long de la droite présentent les mêmes concentrations en Mg²⁺ que l'eau de dilution, ceux qui sont représentés par des points sus-jacents à la droite ont des concentrations plus élevées et ceux qui correspondent aux points sous-jacents ont des concentrations plus faibles. On retrouve ce comportement aussi bien dans le groupe des eaux de la zone Est que dans celui de la zone Ouest. Les points qui sont situés le long de la droite ont tendance à s'étaler, ce qui traduit vraisemblablement une minéralisation issue des embruns marins qui se sont infiltrés avec les eaux de pluies. L'évolution des points qui sont au dessus de la droite vers le pôle de l'eau de pluie correspond à des eaux dont les concentrations en Mg²⁺ sont diluées par des apports d'eau douce.

Sur les courbes de dilution on observe que lorsqu'on va du pôle de l'eau de pluie vers le pôle de l'eau de mer, les concentrations en Mg²⁺ diminuent. On observe également qu'il y a des points situés au dessous de la droite de dilution au voisinage du pôle de l'eau de mer (pôle de

concentration maximale en Mg^{2+}) qui pourraient correspondre à des phénomènes d'échanges de bases où les ions Mg^{2+} sont échangés par les ions Ca^{2+} . On remarque à ce niveau, sur les mêmes points et pour la même période, une évolution inverse des concentrations en Mg^{2+} et en Ca^{2+} . A l'Ouest où la nappe est couverte par des formations basaltiques, l'altération des silicates contribuerait, en plus de l'influence marine, à la production de Mg^{2+} , ce qui augmente ainsi la concentration de cet élément dans ce secteur, d'où la proximité des points de cette zone avec le pôle de l'eau de mer.

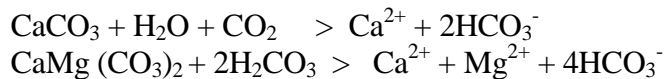
En effet, des études antérieures ont montré que la proportion de Mg^{2+} dans la composition des couches volcaniques de la zone Ouest est relativement élevée avec des teneurs qui atteignent jusqu'à 51ppm. Ainsi, les ions Mg^{2+} issus de l'altération de ces couches volcaniques contribueraient à la minéralisation de la nappe dans la zone Ouest. Cela paraît en accord avec le pic observé dans la zone Ouest sur la figure de l'évolution sur le transect Est/Ouest. Cette observation semble confirmée par l'évolution du ratio Mg^{2+}/Ca^{2+} d'Est en Ouest qui montre une augmentation du ratio dans les ouvrages situés dans la zone de couverture basaltique. L'augmentation du rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} de l'Est vers l'Ouest (0,3 à 0,7) est corrélée avec une augmentation des valeurs de l'indice de saturation (IS)* de la calcite (déterminées à l'aide du programme PC WATEQ) qui vont de -7,5 à +0,2. Ce processus qui a été observé par des études antérieures indique une précipitation de la calcite vers l'Ouest qui favorise une augmentation du Mg^{2+} .

* IS = $\log(PAI/K)$ où PAI = produit de l'activité des ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} ; K = constante d'équilibre.

Profil des ions calcium (Ca^{2+}) : Le profil montre que les teneurs en Ca^{2+} atteignent des valeurs maximales de 134mg/l sur des puits situés à l'Est (Puits de Bayakh) où le substratum carbonaté est peu profond. Ceci explique la dominance de faciès calciques sur le faciès sodique dans cette partie de l'aquifère. Pour les teneurs en Ca^{2+} aussi, les valeurs sont au dessous de la concentration maximale admissible de 100mg/l pour la consommation humaine, sauf pour les zones de bordure de mer et du lac Retba.

Par ailleurs, la quasi-totalité des points (aussi bien de la zone Est que la zone Ouest) sont situés au dessus de la courbe de mélange théorique entre l'eau de mer et l'eau de pluie. La position des points montre une tendance à un décalage vertical par rapport à la droite et à étalement. Le décalage verticale et le regroupement des point au dessus de la droite de dilution suggèrent un apport en Ca^{2+} supplémentaire par rapport aux teneurs de l'eau de mélange et l'étalement des points qui se rapprochent du pôle de l'eau de mer met en évidence des phénomènes de concentration par évaporation. L'apport supplémentaire en Ca^{2+} pourrait être attribué à deux facteurs principaux : à la dissolution du substratum carbonaté qui constitue le mur de l'aquifère dans la zone Est et à l'altération des minéraux des couches volcaniques de la zone Ouest avec les pyroxènes qui peuvent contenir jusqu'à plus de 22ppm et les feldspaths jusqu'à plus de 10ppm. Il n'y a pas de corrélation significative entre les ions Ca^{2+} et les ions HCO_3^- , ce qui indique que le Ca^{2+} n'est pas lié à la seule dissolution des roches carbonatées ; en effet, à part ce dernier phénomène, les ions HCO_3^- peuvent provenir de la diffusion du CO_2 atmosphérique dans la nappe. Les réactions de dissolution des roches carbonatées et de la diffusion du CO_2 mises en œuvre sont respectivement les suivantes :

(dissolution)



(diffusion du CO_2 atmosphérique dans la nappe)



(dissociation de l'acide carbonique formé)



Profil des ions sodium (Na^+) : Le profil montre également que les teneurs en sodium Na^+ présentent les valeurs les plus élevées en bordure océanique (165mg/l) et dans les environs des lacs hypersalés (124mg/l). Pour les teneurs en Na^+ , c'est seulement en bordure océanique que les valeurs sont supérieures à la concentration maximale admissible de 150mg/l pour la consommation humaine.

Par ailleurs, la minéralisation globale de la nappe en Na^+ (zones Est et Ouest) est homogène avec celle de la droite de mélange théorique et ceci est en accord avec la caractéristique littorale de la région d'étude. L'étalement des points, du voisinage du pôle de l'eau de pluie au voisinage du pôle de l'eau de mer exprime la succession de phénomènes de concentration et de dilution. En plus de l'effet de l'évaporation, la concentration en Na^+ peut être due à une influence directe ou indirecte de la mer. L'influence directe est observée à l'Ouest où les points correspondants sont proches du pôle de l'eau de mer. Cette observation est confortée par les études antérieures qui ont mis en évidence une avancée de l'eau de mer jusqu'à 500m à l'intérieur des terres contaminant ainsi les eaux douces de la nappe phréatique. Par contre dans la zone Est, on peut envisager une influence indirecte de l'eau de mer où la minéralisation est due à des dépôts d'embruns marins qui s'infiltrent par la suite à la faveur des pluies.

Profil des ions potassium (K^+) : Le profil montre que les concentrations les plus élevées sont localisées en bordure de la zone périurbaine (18mg/l). L'ensemble des points étudiés (sauf le piézomètre p2.2), font observer des concentrations en ions K^+ qui sont au dessous de la concentration maximale admissible de 12mg/l pour la consommation humaine.

Par ailleurs, l'évolution des teneurs en ions K^+ de la nappe par rapport à la droite de dilution théorique montre que les points sont situés de part et d'autre de la droite. Les points qui sont situés au dessus correspondent tous aux eaux de la nappe libre (zone Est). Ces eaux ont des concentrations en ions K^+ supérieures à celles de l'eau de mélange entre l'eau de mer et l'eau de pluie. Ainsi, dans la zone Est, on peut lier la minéralisation en ions K^+ à un apport dû à la dissolution des argiles contenues dans les sédiments sableux. Quant aux points situés sous la droite, ils représentent des eaux ayant de plus faibles concentrations en ions K^+ . Dans ce cas, dans la zone Est, l'effet de dilution jouerait un rôle sur certains points et la dissolution des teneurs minéraux des roches basaltiques fournirait des ions K^+ ; leurs concentrations atteignant pratiquement pas 1ppm.

Profil des ions sulfates (SO_4^{2-}) : Le profil montre que les concentrations les plus élevées pour les sulfates SO_4^{2-} semblent beaucoup plus liées aux lacs hypersalés (350mg/l) qu'à la proximité de la mer (36mg/l). Au niveau des zones lacustres, les teneurs en SO_4^{2-} sont supérieures à la concentration maximale admissible de 250mg/l pour l'eau de boisson. La relation SO_4^{2-} vs Cl^- montre que la minéralisation de la nappe en SO_4^{2-} est clairement sujette à des phénomènes de dilution et à des phénomènes de concentration. En effet, on observe que les points ayant des teneurs inférieures à celles de l'eau de dilution sont plus proches du pôle de l'eau de pluie et les points qui ont des teneurs supérieures sont les proches du pôle de l'eau de mer.

L'apport en SO_4^{2-} à la nappe peut être dû à la dissolution de gypse qui est un sulfate de calcium hydraté (Ca^{2+} , SO_4^{2-} , $2\text{H}_2\text{O}$) ou à des apports indirects marins liés eaux de pluie dont la minéralisation est dominée par les ions SO_4^{2-} après les ions Na^+ . La concentration des eaux de pluie au niveau des zones lacustres expliquerait ainsi les pics de minéralisation mis en évidence par les profils d'évolution Est/Ouest.

Profil des ions chlorure (Cl^-) : Le profil montre que les valeurs les plus élevées sont localisées à proximité de la mer (331mg/l) et dans la zone des lacs hypersalés (263mg/l) où elles sont supérieures à la concentration maximale admissible de 200mg/l. Notons que les valeurs restent relativement importantes aussi dans la zone périurbaine de Thiaroye-Yeumbeul où la moyenne des teneurs est autour de 150mg/l.

Profil des ions (HCO_3^-) : Pour les bicarbonates HCO_3^- (fig.45), les valeurs les plus élevées se rencontrent en bordure océanique (341mg/l) et dans la partie libre de la nappe la moins influencée par les habitations humaines (132mg/l). Dans cette zone les eaux sont beaucoup plus bicarbonatées que chlorurées. En plus de l'influence très probable du mur carbonaté de l'aquifère sur la production de bicarbonate, il y a certainement une forte influence de la diffusion du CO_2 gazeux dans cette partie libre peu habitée de la nappe.

Profil des ions nitrates (NO_3^-) : L'évolution des NO_3^- sur le profil Est/Ouest montre que les concentrations sont assez variables. A l'Est de la presqu'île les teneurs moyennes sont autour de 20mg/l, dans le col correspondant à la zone périurbaine, elles dépassent 200mg/l et à l'Ouest elles s'approchent de 50mg/l. Les faibles valeurs de concentration en nitrates de 20mg/l enregistrées à l'Est de la zone périurbaine coïncident avec un environnement sous couvert naturel peu influencé par l'habitat humain, les teneurs excessives de plus de 200mg/l avec l'environnement périurbain non assaini caractérisé par la prédominance d'habitats informels et les teneurs moyennes de 50mg/l à l'Ouest avec une zone urbaine assainie où la nappe est captive et en continuité avec celle de la nappe libre de la zone périurbaine. L'importance de contamination de la nappe phréatique par des teneurs excessives en NO_3^- doit tenir compte de la détermination de l'origine et des mécanismes de la contamination, du comportement chimique des formes minérales de l'azote, de la caractérisation et de l'évolution des tendances de la pollution.