

**UNEP / UNESCO / UN-HABITAT / ECA**

**URBAN POLLUTION OF SURFICIAL AND  
GROUNDWATER AQUIFERS VULNERABILITY  
IN AFRICA**

**AQUIFERE SUPERFICIEL ET POLLUTION  
URBAINE EN AFRIQUE**

**RAPPORT FINAL DU SENEGAL**

**(Décembre 2004)**

**Coordinateurs :**

Messieurs : **Abdoul Aziz TANDIA, Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques,  
Université Cheikh Anta DIOP, Dakar-Fann**

**Ibrahima DEME, Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques,  
Université Cheikh Anta DIOP, Dakar-Fann**

**Mamadou SARR, Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau**

# SOMMAIRE

Introduction

PREMIERE PARTIE : Synthèse des données existantes

1. Géographie
2. Climat
3. Géologie et hydrogéologie

DEUXIEME PARTIE : Résultats des travaux réalisés dans le cadre du projet

1. Profondeur et piézométrie de la nappe
  - 1.1. Evolution spatiale
  - 1.2. Variations saisonnières
2. Hydrochimie
  - 2.1. Paramètres physico-chimiques
    - 2.1.1. Température de la nappe
    - 2.1.2. pH de la nappe
    - 2.1.3. Conductivité électrique de la nappe
      - 2.1.3.1. Evolution spatiale
      - 2.1.3.2. Evolution temporelle
  - 2.2. Faciès chimique et minéralisation de la nappe
3. Etude de la pollution azotée
  - 3.1. Evolution spatiale
  - 3.2. Evolution Temporelle
    - 3.2.1. Variation interannuelle

### 3.2.2. Suivi hebdomadaire

## 4. Vulnérabilité de la nappe à la pollution azotée

### 4.1. Paramètres étudiés

### 4.2. Cartes de vulnérabilité de la nappe

## 5. Relation eaux de mer – eaux de la nappe : problème du biseau salé

## 6. Modélisation de l'écoulement de la nappe infrabasaltique

### 6.1. Principe des modèles

#### 6.1.1. Equation de diffusivité

#### 6.1.2 Résolution numérique par la méthode des différences finies

### 6.2. Construction du modèle

#### 6.2.1. Structure de l'aquifère

#### 6.2.2. Conditions aux limites

##### 6.2.2.1. Limites à potentiels imposés

##### 6.2.2.2. Limites à flux imposés

#### 6.2.3. Discrétisation

#### 6.2.4. Prélèvements

#### 6.2.5. Paramètres hydrodynamiques

#### 6.2.6. Recharge

### 6.3. Validation du modèle

## **Introduction :**

Le projet Aquifères superficiels et pollution urbaine en Afrique est une activité développée conjointement par le PNUE-DEWA (Division de l'évaluation scientifique de l'alerte précoce) comme l'agence Maître d'œuvre du projet et l'UNESCO/PHI comme le partenaire pour son exécution. Le projet a été conçu en collaboration avec UN-Habitat et la CEA (Commission Economique Africaine).

Après une première phase qui a abouti à l'élaboration d'une carte de vulnérabilité des nappes urbaines dans six pays de l'Afrique de l'Ouest, la deuxième phase du projet a été lancée lors de la réunion de Nairobi – Kenya du 11 au 13 mars 2003.

Les objectifs visés dans cette deuxième phase sont :

- développer des méthodologies adéquates pour une surveillance optimale de la contamination réelle et potentielle des aquifères superficiels et profonds des nouvelles villes sélectionnées par le projet
- actualiser et harmoniser les acquis du projet sur la pollution des aquifères superficiels et profonds en milieu urbain africain
- établir un réseau d'alerte rapide et d'échange d'information en cas de pollution des ressources d'approvisionnement
- déterminer l'état et la vulnérabilité des nappes des villes choisies

## **PREMIERE PARTIE : Synthèses des données existantes**

Le présent travail sera basé principalement sur les banques de données et les documents disponibles :

- au SGPRE du Ministère de l'Hydraulique (rapports techniques internes etc...);
- au Département de Géologie de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD (mémoires de DEA, de thèses etc...);
- au Département de Géographie de la Faculté des Sciences humaines et de lettres de l'UCAD (mémoires de DEA, de thèses etc...);

En effet, la nappe des sables quaternaires a fait l'objet d'assez nombreuses études concernant son alimentation (Martin, 1970; Gaget, 1920; Hubert, 1918), la potabilité des eaux (OMS, 1972; BRGM, 1967) et la dynamique saline (Gaye et al., 1989). De même, les Départements de Géologie de Géographie de l'Université Cheikh Anta Diop et la bibliothèque du Ministère de l'Energie, des Mines et de l'Hydraulique disposent d'une importante base de données sur la nappe phréatique de la région de Dakar. La synthèse a permis d'avoir les informations sur les paramètres suivants : la géographie, la climatologie, la géologie et l'hydrogéologie.

### **1. Géographie**

La zone d'étude est la même que celle choisie dans la première phase. Elle correspond à la presqu'île du Cap-vert dans la région de Dakar (Fig. 1) . Elle constitue la partie la plus occidentale du Sénégal caractérisée sur le plan géomorphologique par deux dômes (tête de la Presq'île et horst de Ndiass) séparée par de longs alignements de dunes orientées NE-SO.

Dans cette zone, l'alimentation en eau potable des populations repose pour 80% sur l'exploitation des eaux souterraines. Déjà de 1925 à 1939, le captage des eaux de la nappe phréatique par les forages d'exploitation fournissait un débit de  $3000 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$  (Martin, 1970). L'augmentation de la population qui passe de 50000 en 1933 à 150000 habitants en 1946 imposa une augmentation des débits de pompage à  $12000 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$  en suite à  $24000 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$  en 1949. Il s'ensuivit une intrusion marine dans les ouvrages situés à proximité du littoral où l'eau salée est directement en contact avec l'eau douce de la nappe phréatique. Les premières mesures prises furent la fermeture de certains ouvrages d'exploitation envahis par le biseau salé et la mise en service de la nappe phréatique de la zone périurbaine de Dakar. Plusieurs ouvrages d'exploitation y furent ainsi réalisés. Cependant, à cause du développement de l'habitat informel dans cette zone périurbaine, le risque de contamination de la nappe phréatique par les nitrates d'origine anthropique s'accroît ; ce problème a été signalé par certains auteurs (OMS, 1972 ; Collin et Salem, 1989).

Lorsque la pollution nitratée survient, elle peut, d'une part être un risque sanitaire pour les populations qui consomment directement les eaux des puits contaminés et d'autre part perturber temporairement la distribution de l'eau potable. Pour l'endiguer, il faudra déterminer son origine et définir les modèles adéquats de son évolution. C'est pourquoi une prévention rigoureuse, basée sur une analyse systématique des différents phénomènes impliqués est importante pour étudier leur évolution. Ceci constituera, pour le distributeur d'eau, une donnée capitale en amont pour orienter une bonne politique de gestion des ressources en eau contaminées.

Dans le cadre de notre projet, pour étudier la contamination de la nappe des sables quaternaires de la région de Dakar par les nitrates, nous allons entreprendre des campagnes de prélèvement et d'analyse d'eau de la nappe phréatique sur une trentaine d'ouvrages d'exploitation et de surveillance (puits, forages, piézomètres).

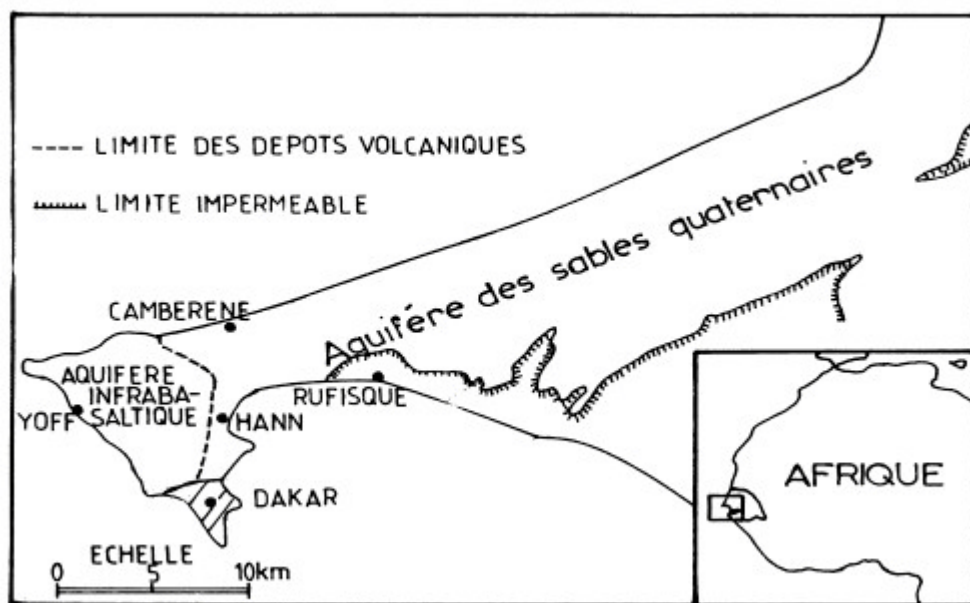


Figure 1 : Localisation de l'aquifère étudié

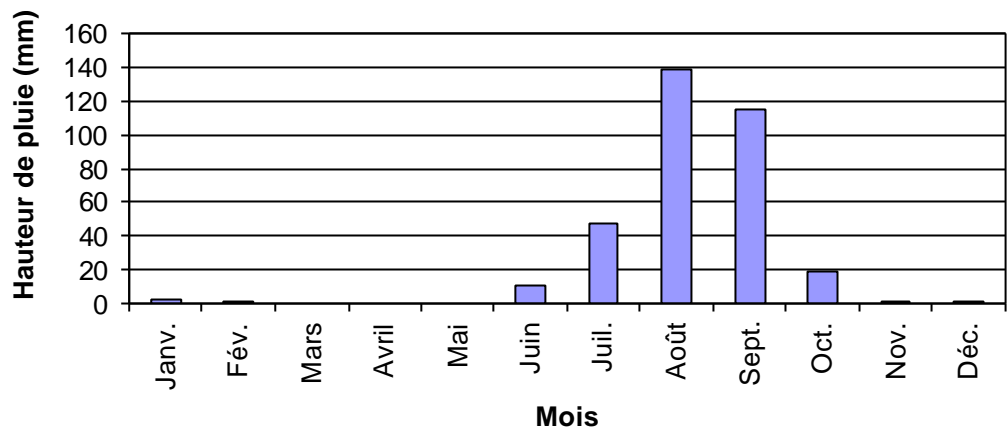
## **2. Climat**

La climatologie de la zone intertropicale est caractérisée par une dynamique complexe liée à des transferts énergétiques qui sont essentiellement contrôlées par les centres d'action de Sainte Hélène (Atlantique sud), des Açores (Atlantique nord) et celui de la zone saharo-libyenne (Nord-Est africain) (Leroux, 1983). 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 (Olivry, 1989). Le contact au sol de la mousson et de l'alizé continental constitue le front 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<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> 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 (Olivry, 1983). Au Sénégal le climat est de type tropical subdésertique ponctué par des étés humides et des hivers secs. Par contre, la presqu'île du Cap-Vert 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 (Le Borgne, 1988;Olivry, 1989).

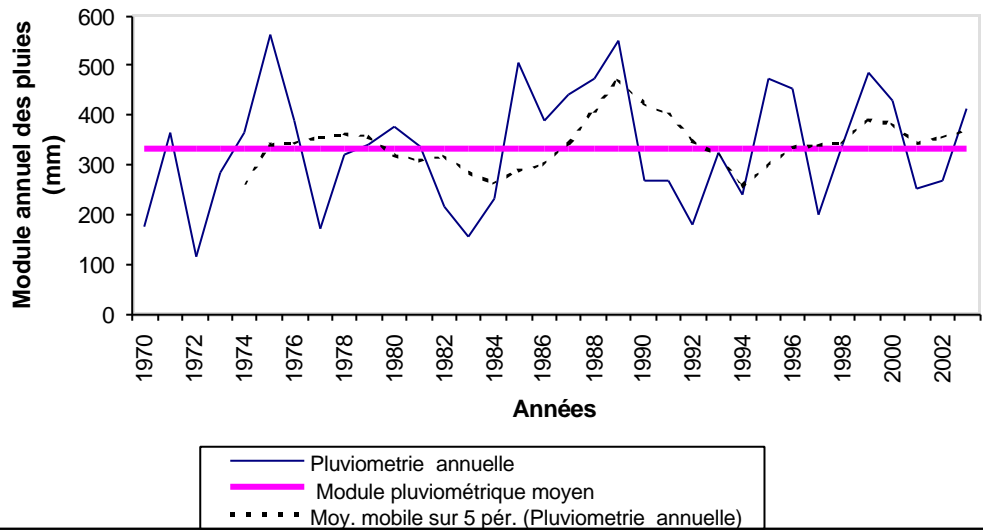
***Précipitations*** : Les précipitations de la saison des pluies sont générées par la mousson qui provient de l'alizé issu de l'anticyclone de Sainte Hélène. Celle-ci se charge d'humidité et atteint le Sénégal selon le sens Nord-Est dès le mois d'Avril. La durée, l'intensité et la répartition saisonnière 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 (Olivry, 1983). 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 300 et 400mm et la quasi-totalité des précipitations se situe entre 0,1 et 50mm. La figure 2 montre que le cœur de la saison des pluies se situe aux mois d'Août à Septembre avec respectivement des maximums de 138mm et 115mm, la saison sèche se situant entre les mois d'Octobre à Novembre aux mois de Mai à Juin.

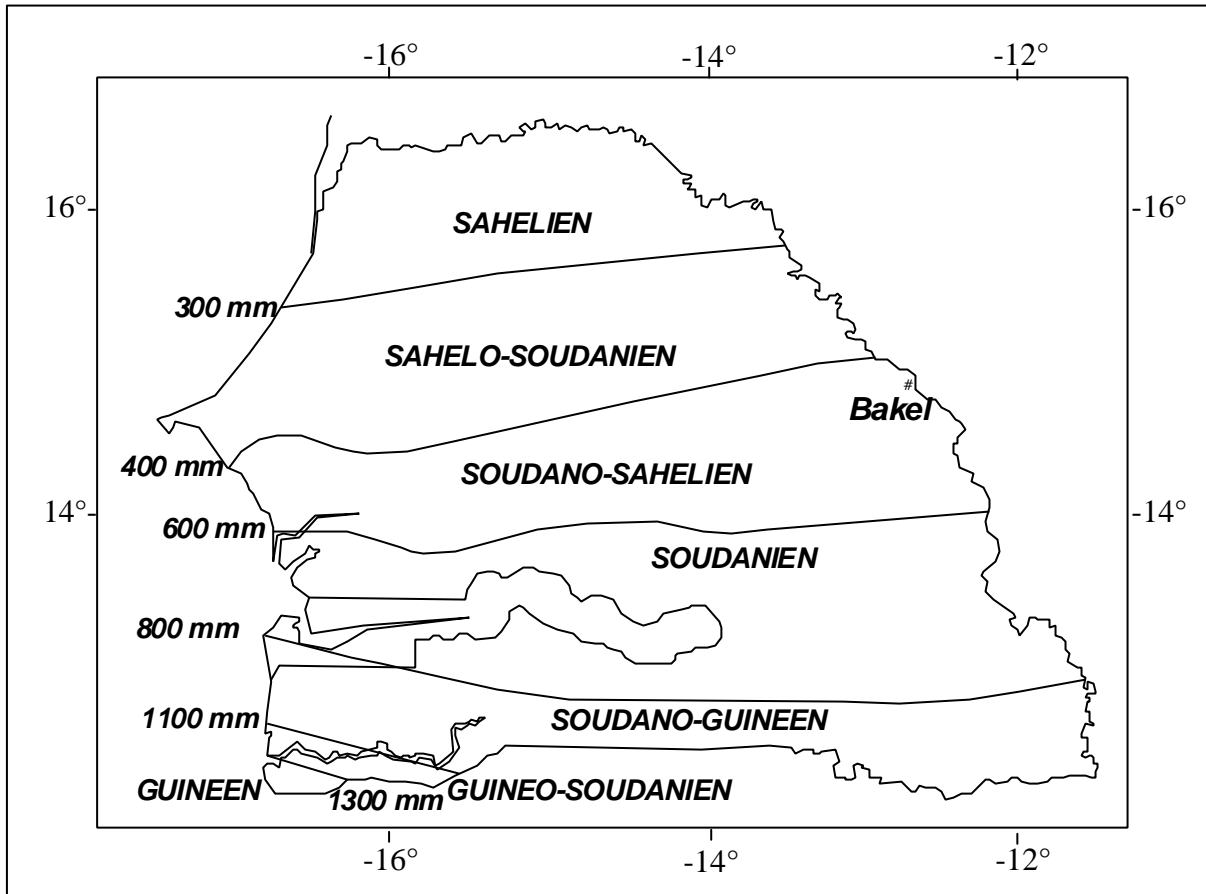
Le régime actuel des précipitations est caractérisé par une persistance de la baisse des hauteurs de pluie depuis les années 1970. Cette sécheresse a ramené les isohyètes moyennes à 200mm au Nord et 1200mm au sud contre 400mm et 1500mm (Fig.3) au cours des périodes précédentes (Leroux, 1983). Ce déficit des précipitations à partir de 1969 est visible sur la moyenne mobile des précipitations calculée au pas annuel sur 5ans. Cependant on note une hausse de la pluviométrie ces dernières années (fig 4).

**Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelle de la station de Dakar de 1970 à 2003**



**Figure 3 : Chronique des précipitations de 1970 à 2003 à la station de Dakar**





**Figure 4 : Répartition actuelle des isohyètes au Sénégal**

**Température :** La température moyenne annuelle calculée sur la période 1978-2003 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 mai à novembre et une période froide allant de décembre à février (tab.1)

**Humidité relative :** 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 75%. Les valeurs les plus élevées coïncident avec le cœur de la saison des pluies et les faibles aux mois d'Avril-Mai et Octobre à Décembre-Janvier.

**Evaporation et évapotranspiration :** L'évaporation et l'évapotranspiration correspondent à des phénomènes de perte de l'eau sous forme de vapeur. Ils dépendent de phénomène physique et physiologique. Les valeurs de l'évaporation Piche oscillent entre 50mm en Septembre et 102mm en Décembre-Janvier et celles de l'évapotranspiration Turc évoluent entre 141mm (Septembre) et 173mm (Avril-Mai).

**Tableau 1 : Moyennes mensuelles des températures (°C), de l'évaporation Piche (mm) et de l'humidité relative (%)**

Mois	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Temp (°C)	21.3	21.3	21.6	21.8	22.6	25.9	27.3	26.8	27.8	27.9	26.3	23.8
E.P. (mm)	88	79	74	66	62	64	68	57	50	66	91	102
H.R. (%)	68	72	74	79	79	79	77	80	81	78	70	65

**Radiation, insolation** :La radiation et l'insolation sont des paramètres qui interviennent dans la quantification des phénomènes de l'évapotranspiration (formules de Turc, de Penmann, etc.). La radiation est exprimée en cal/cm<sup>2</sup>/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 (tab.2). Quant à la radiation, la valeur moyenne mensuelle la plus élevée est de 2462 J/cm<sup>2</sup> et se situe dans la période allant de Mars à Juin, alors que la plus faible est de 1340 J/cm<sup>2</sup> correspondant aux mois de Juillet à Février.

**Tableau 2 - Insolation moyenne mensuelle (heures/jour) 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	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

**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 (Tab.3) évoluent entre 2,9m/s pendant le mois de septembre et 5,3m/s pendant le mois de Mars.

**Tableau 3 - 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

### **3.Géologie et hydrogéologie**

La géologie du Cap-Vert s'inscrit dans celle du bassin sénégal-mauritanien et la stratigraphie locale est connue grâce aux affleurements, aux prospections pétrolières et aux forages hydrauliques (Fig.5) Le socle anté-mésozoïque se situerait à la verticale de Dakar à une profondeur de 8000 m ou plus. Des dépôts marins continus allant du Lias à l'Oligocène sont connus. Entre le Miocène et le Quaternaire, se produisent différentes manifestations volcaniques, des altérations latéritiques à l'origine de cuirasses et des dépôts de sable éoliens et littoraux. Au plan structural, la partie du bassin comprise entre Thiès et Dakar a été affectée par des failles verticales (direction Nord-Sud à NE-SW) qui sont à l'origine de la formation des horsts de Diass et de Dakar qui encadrent le graben de Rufisque- Sangalkam où les dépôts sont subsidents. Un basculement général a en outre affecté ces horsts. Leur partie sud s'est soulevée, exposant à l'affleurement des terrains du Crétacé terminal et du Tertiaire (entre Yène et Popenguine dans le horst de