

Etude De La Qualité Des Eaux Souterraines Utilisées Pour L'irrigation Et Eventuellement Pour La Boisson Dans La Zone Du Technopole De Pikine (Sénégal)

Mouhamadou Thierno Gueye¹, Dame Bop², Aissatou Ndoye³, Sabrina Sorlini⁴

¹Université Cheikh Anta Diop de Dakar
Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie
Sénégal

²Université Cheikh Anta Diop de Dakar
Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie
Sénégal

³Office Nationale de l'Assainissement du Sénégal
Laboratoire de décharge et de contrôle
Sénégal

⁴Università degli studi di Brescia
Laboratoire de recherche sur les technologies appropriées pour la gestion
de l'environnement dans les pays à ressources limitées
Italie



Résumé— Le but de notre étude est l'évaluation de la qualité des eaux souterraines dans la zone du Technopole pour l'irrigation et éventuellement la boisson afin de diminuer les inondations très fréquentes dans cette localité. Ainsi, la qualité des eaux de la nappe du Technopole est assez bonne pour l'irrigation mais très mauvaises pour la consommation humaine. A l'exception de la conductivité (en moyenne 4400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ > 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ valeur guide de l'OMS) et du phosphore total (en moyenne 12,75 mg/L > 10 mg/L valeur guide de l'OMS), tous les autres paramètres des eaux souterraines respectent les valeurs limites de l'OMS pour l'irrigation. Par contre, concernant les paramètres de potabilité mesurés, il n y a que les nitrates qui respectent la limite qui est de 50 mg/L dans certains points avec une moyenne de 46,4 mg/L. En effet, nous avons des milliers de U/100 mL d'Escherichia coli alors qu'il devrait être absent dans les eaux destinées à la boisson. Par ailleurs, nous avons aussi des concentrations de TDS très élevées dans l'aquifère du Technopole avec une moyenne de 3200 mg/L alors qu'elle est généralement considérée comme bonne si c'est inférieur à environ 600 mg/L. Cette pollution est directement liée aux rejets des eaux usées de la station d'épuration (STEP) et aux activités agricoles mais également entretenue par une mauvaise gestion des eaux usées dans la zone. Par conséquent, la non utilisation de l'eau de la nappe du Technopole, réduit le pourcentage d'eau absorbée par le sol et augmente le pourcentage d'eau qui reste en surface avec de mauvaises qualités correspondant aux inondations très fréquentes dans cette localité. Cependant, une étude complémentaire est nécessaire pour vérifier aussi la présence ou pas des métaux lourds et/ou des pesticides dans la nappe du Technopole afin de proposer un traitement adéquat de l'ensemble des contaminants.

Mots clés— eaux souterraines, irrigation, potabilité, inondation, Technopole

Abstract—The purpose of our study is to assess the quality of groundwater in the Technopole area for irrigation and possibly drinking in order to reduce the very frequent floods in this locality. Thus, the water quality of the Technopole aquifer is quite good for irrigation but very poor for human consumption. With the exception of conductivity (on average 4400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ > 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ WHO guide value) and total phosphorus (on average 12.75 mg/L > 10 mg/L WHO guide value), all other groundwater parameters comply with the WHO limit values for irrigation. On the other hand, concerning the potability parameters measured, only nitrates respect the limit which

is 50 mg/L in certain points with an average of 46.4 mg/L. Indeed, we have thousands of U/100 mL of Escherichia coli when it should be absent in the drinking water. On the other hand, we also have very high TDS in the Technopole aquifer concentrations for the drink with an average of 3200 mg/L whereas it is generally considered good if it is below about 600 mg/L. This pollution is directly linked to wastewater discharges from the waste water treatment plant (WWTP) and agricultural activities, but also maintained by poor wastewater management in the area. Consequently, the non-use of water from the Technopole aquifer reduces the percentage of water absorbed by the ground and increases the percentage of water that remains on the surface with poor qualities corresponding to the very frequent floods in this locality. However, an additional study is necessary to also verify the presence or absence of heavy metals and/or pesticides in the Technopole groundwater in order to propose an adequate treatment of all contaminants.

Keywords— groundwater, irrigation, potability, flooding, Technopole

I. INTRODUCTION

L'importance de l'eau, de l'assainissement et de l'hygiène pour la santé et le développement transparaît dans les conclusions d'une série de forums politiques internationaux. Parmi les plus récents, figure notamment l'adoption des Objectifs de développement durable par les pays en 2015 incluant une cible et des indicateurs pour la sécurité sanitaire de l'eau de boisson. En outre, l'Assemblée générale des Nations Unies a déclaré en 2010 qu'une eau de boisson sûre et saine et l'assainissement étaient un droit de l'homme essentiel à la pleine jouissance de la vie et à l'exercice de tous les droits de l'homme. Ces engagements sont conformes à un soutien de longue date, notamment l'adoption par l'Assemblée générale des Nations Unies des Objectifs du Millénaire pour le développement en 2000 et la proclamation de la période 2005 – 2015 : Décennie internationale d'action sur le thème « L'eau source de vie » [1].

En effet, les facteurs environnementaux sont l'une des principales causes de décès, de maladie et d'invalidité, en particulier dans les pays en développement. On estime que les impacts qui en résultent produisent environ 25% des décès et des maladies dans le monde et atteignent près de 35% dans des régions telles que l'Afrique subsaharienne [2]. Dans ces analyses sont inclus les risques pour l'environnement liés au travail, à la maison et au cadre de vie. La principale proportion de cette responsabilité environnementale globale liée aux maladies peut être attribuée à quelques domaines de risque clés. Ceux-ci incluent la qualité rare de l'eau, la non-disponibilité de l'assainissement ; la mauvaise qualité de l'air ambiant intérieur ; les substances toxiques ; et le changement environnemental global. Dans de nombreux cas, des mesures préventives simples existent pour réduire l'impact de la maladie sur ces risques.

Par ailleurs, des estimations des décès dans le monde dus aux causes environnementales les plus importantes et à certaines maladies à forte composante environnementale : l'eau insalubre, et les mauvaises conditions d'hygiène et d'assainissement tuent environ 1,7 million de personnes par an, en raison notamment de maladies diarrhéiques [3] ; en 2012, environ 842 000 décès dans les pays à revenu moyen et faible ont été provoqués par de l'eau potable contaminée, des installations de lavage des mains inadéquates et des services d'assainissement inappropriés ou inadéquats [4].

Ainsi, l'urbanisation est l'une des principales causes de la mauvaise qualité des cours d'eau et des bassins si l'assainissement fait défaut. Au cours des 30 prochaines années, la plus grande partie de la croissance démographique mondiale se produira dans les zones urbaines des pays en développement [5]. L'augmentation rapide de la population et les styles de développement urbain non planifiés, sans contrôle ni réglementation, font des grandes villes les foyers de risques émergents pour l'environnement et la santé [6]. Les impacts sur la santé des risques environnementaux sont les plus importants parmi les populations pauvres et vulnérables des pays en développement. Ils ont moins accès aux sources d'eau potable, mais ils sont aussi les plus directement exposés aux risques environnementaux dus à une mauvaise utilisation des terres. Les populations pauvres peuvent aussi être les plus dépendantes des ressources naturelles et donc être les plus touchées par une exploitation non durable ou un épuisement de ces ressources [7].

Au Sénégal, pour le traitement apporté à l'eau après l'avoir puisé, au niveau national 73,9% des ménages ne le font pas. En milieu urbain 84,4% ne s'adonnent pas à cette pratique contre 64,7% en milieu rural [8]. Selon le milieu de résidence, le type de toilettes utilisé diffère. En milieu rural, les toilettes non améliorées sont plus fréquemment utilisées (58%). Un peu plus du quart des ménages ruraux ne disposent pas de toilettes et utilisent la nature comme lieu d'aisance (29%) et 28% ont principalement recours à des latrines traditionnelles. A l'inverse, en milieu urbain, les ménages utilisent généralement des toilettes améliorées, pour

l'essentiel des lieux d'aisance munis d'une chasse mécanique ou manuelle raccordés à une fosse septique (34%) ou un réseau d'égout (14%) et des latrines à fosse avec dalle (38%). EN 2015 le Sénégal n'a pas atteint la cible qui était fixée à 77% par les objectifs du millenium pour le développement (OMD) concernant la couverture en assainissement améliorée qui était de 37% au niveau national [9].

En outre, une irrigation excessive peut augmenter le niveau des nappes phréatiques provenant d'aquifères. Ainsi, la consommation d'eau augmente en raison de l'impact des tendances démographiques et de l'intensification des activités agricoles et industrielles. Les activités agricoles libèrent plusieurs types de polluants dans l'environnement. Ces polluants ont des répercussions sur les écosystèmes aquatiques en raison de leur importation à partir des exploitations, du transport le long du cycle hydrologique et de la concentration dans les plans d'eau. Les voies de pollution types sont les suivantes : la percolation dans les eaux souterraines ; le ruissellement de surface, l'eau de drainage, et l'écoulement vers les cours d'eau, les rivières et les estuaires ; l'adsorption sur les sédiments issus de l'érosion d'origine naturelle ou humaine vers des ruisseaux riches en sédiments [10]. La libération de nutriments (azote, phosphore et potassium) et de produits agrochimiques issus de l'agriculture intensive et des déchets d'origine animale peuvent accélérer l'eutrophisation des ressources en eau douce et des écosystèmes marins côtiers et augmenter la pollution des eaux souterraines. On affirme aujourd'hui que la mobilisation excessive des nutriments est allée au-delà des frontières planétaires [11]. Or, une accumulation excessive de nutriments peut également accroître les effets néfastes sur la santé tels que le syndrome du bébé bleu, qui peut être causé par une forte concentration de nitrates dans l'eau potable [12].

Cependant, face à une demande d'eau en augmentation constante due à la forte concentration de la population dans la capitale sénégalaise à Dakar qui représente le quart de la population nationale [13] engendrant des rejets importants d'eaux usées, d'excréta [14], de déchets solides [15] dans la zone du Technopole [16] qui abrite une station d'épuration. Par ailleurs, la zone du Technopole est une zone très propice à l'agriculture [17], ainsi, les eaux souterraines et les eaux usées traitées sont utilisées par les agriculteurs. Par conséquent, la nappe superficielle, le rejet des eaux usées traitées par la station d'épuration, les canaux d'évacuation des eaux pluviales et stagnantes des quartiers voisins, les eaux pluviales pendant l'hivernage ont saturé les eaux de la nappe et entraîne des inondations annuelles dans ces environs. Ainsi, en plus de son utilisation agricole, les eaux souterraines dans la zone du Technopole peuvent être destinées à la boisson à grande échelle mais aussi pour l'industrie ce qui pourrait baisser son niveau dans la nappe afin de diminuer les inondations très fréquentes dans cette localité.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. La zone d'étude

Le Sénégal se trouve à l'extrême ouest du continent africain. La capitale sénégalaise Dakar s'étend sur 550 km² entre les longitudes 16 ° 55 'et 17 ° 30' ouest et les latitudes 14 ° 55 'et 14 ° 35' nord [18]. Son climat est de type canarien subit fortement l'influence des facteurs géographiques et atmosphériques. Par la présence d'une façade maritime ceinturant presque toute la région, Dakar est caractérisé, pendant une bonne période de l'année, par un microclimat marqué par l'influence de l'alizé maritime ; d'où l'existence d'une fraîcheur et d'une humidité quasi permanente et relativement forte [8]. La température varie entre 17° et 25° C de décembre à avril et de 27° à 30 ° C de mai à novembre. La pluviométrie est caractérisée par une durée relativement courte de l'hivernage de trois mois de juillet à septembre. L'étude porte sur le Technopole, une zone localisée dans la grande Niaye du département de Pikine à Dakar (Fig.1).



Fig.1: Localisation de la zone d'étude du Technopole à Dakar

Niaye est un terme local utilisé pour désigner les dépressions interdunes où des pratiques agricoles sont développées [19]. C'est une zone fertile d'une importance agricole et maraîchère, qui fournit 80 % de la production totale des légumes aux marchés de Dakar et de l'intérieur du Sénégal [20]. Les sols des Niayes de Pikine sont par excellence, des sols de cultures maraîchères car ce sont des sols à hydromorphie partielle [21]. **Le maraîchage** est la principale activité de la zone du fait qu'il se pratique durant toute l'année. Il bénéficie de conditions climatiques, hydrologiques et pédologiques favorables. Il occupe la majeure partie de la population et reste la première source de revenu. Il implique aussi bien les hommes, les femmes, les jeunes et les vieux encore en activité (Fig. 2).

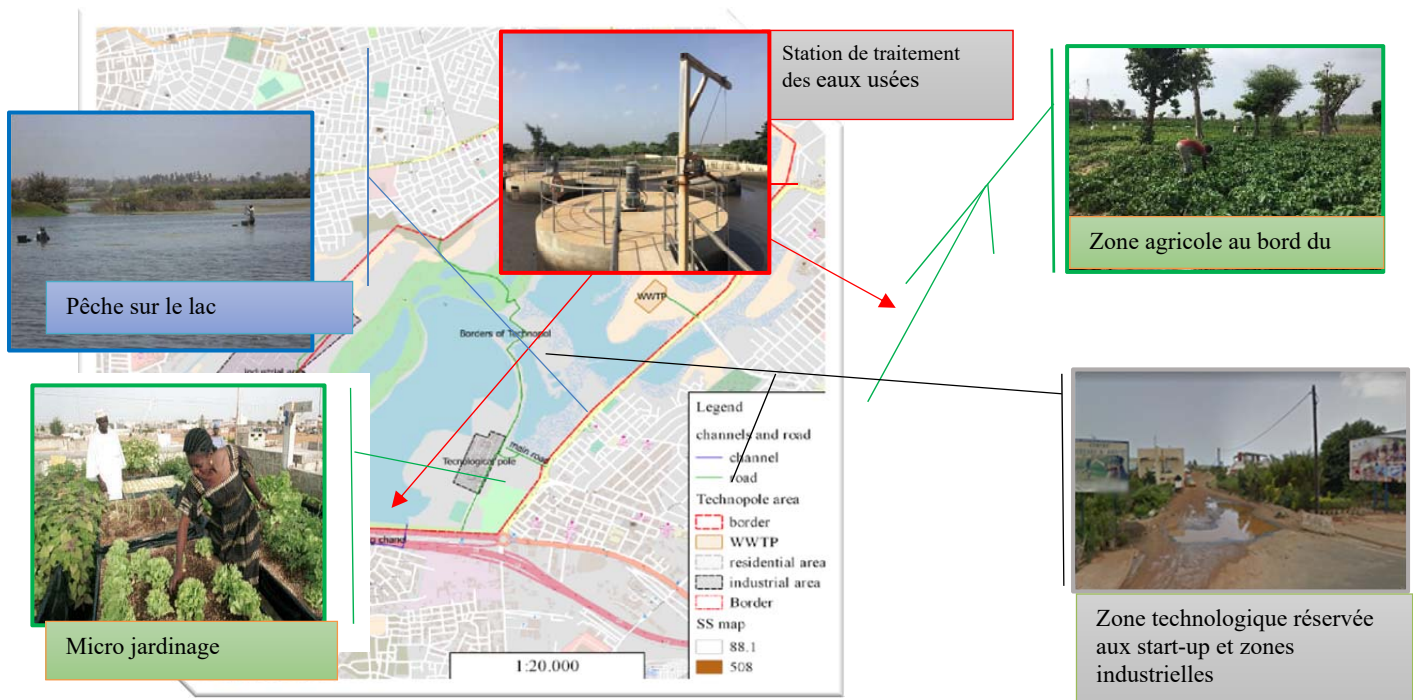


Fig.2: Répartition des différentes activités dans la zone du Technopole

2.2. Échantillonnage

Notre travail s'est basé d'abord sur une enquête qu'on avait menée durant le mois de septembre 2017 dans la zone. Pendant cette période, on avait collecté les informations sur l'ensemble des activités de la zone. On avait interrogé les maraîchers sur leurs différentes activités dans la zone : nature et la qualité de l'eau utilisée (lac, nappe phréatique, eaux usées traitées), type d'engrais chimique (pesticide par exemple) ou naturel (fumier de vache, de volaille...) utilisé, les produits maraîchers récoltés et leurs rendements. La zone de la Technopole est occupée par environ sept cents (700) maraîchers. Pratiquement tous les maraîchers de la zone utilisent la nappe phréatique (céanes) pour les besoins du maraîchage. Ainsi on a choisi onze sites dans la nappe phréatique ($P_1, P_2, P_4, P_7, P_9, P_{25}, P_{28}, P_{30}, P'_{30}, P_{31}, P_{32}$) le long de la zone de maraîchage (Fig. 3 et Fig. 4).

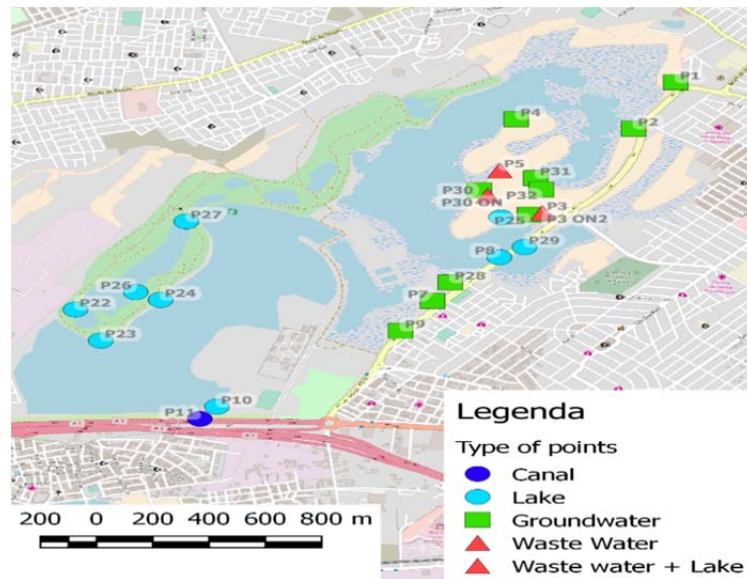


Fig.3: Position des points d'échantillonnage dans la zone du Technopole



Fig.4: Exemple de point d'échantillonnage de la nappe phréatique

Après prélèvement, le pH et la température ont été mesuré par l'appareil pH 340i / SET. La conductivité et le taux de solide dissous TDS ont été mesuré par l'appareil COND 70. D'après nos résultats on a la relation suivante : $CE=1.4 \times TDS$. L'oxygène dissous a été mesuré par oxi 3310 IDS Set 1. Les analyses des paramètres (DCO, DBO, E. Coli, nitrates, nitrites...) ont été effectués par l'appareil HACH DR/4000v Spectrophotomètre du laboratoire de l'office national de l'assainissement du Sénégal. Les mesures de l'azote Kjeldahl et le phosphore total ont été faites au laboratoire de l'ONAS. Le GPS portable garmin etrex 30 a été utilisé pour faire la géolocalisation.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

Les résultats des analyses des paramètres mesurés in situ (conductivité, pH, température, total des solides dissous TDS, oxygène dissous, salinité) sont dans le Tab.1. Ceux des analyses physico-chimiques et microbiologiques sont dans le Tab.2.

Tableau I: Resultats Des Mesures In Situ Dans La Nappe Phreatique

Prélèvement	pH	Cond (μ S/cm)	TDS (mg/L)	O.D (mg/L)	t°(c)	Salinité (mg/L)
P ₁	6,7	3100	2200	5,7	31,5	1
P ₂	6,7	2800	2000	1,5	31	0,9
P ₄	7,7	6300	4500	0,3	31,5	2,1
P ₇	7,4	3900	2800	3,7	29,8	1,2
P ₉	7,3	2400	1700	1,1	30,3	0,7
P ₂₅	7	5600	4100	1,6	28,5	2,6
P ₂₈	7,9	2900	2100	5,9	29,5	0,9
P ₃₀	7	4900	3500	1,8	29,4	1,6
P' ₃₀	6,7	5200	3700	4,8	29,9	1,8
P ₃₁	7,3	5200	3700	2,3	29,5	1,8
P ₃₂	7	6700	4800	1,5	28,8	2,7
Moyenne	7,1	4400	3200	2,7	30	1,4

Tableau II: Resultats Des Parametres Physicochimiques Et Microbiologiques De La Nappe Phreatique

Prélèvement t	MES (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DCO (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	E. Coli (U/100ml)	Enterro (U/100ml)	Colichrom e (U/100ml)
P ₁	41	20	26	68	0.61	10 000	4 560	2 040
P ₂	10	28	35	43	0.55	9 000	3 450	2 880
P ₇	28	18	111	38	2.65	3 000	500	1 000
P ₉	40	13	54	17	1.14	13 000	1 800	12 000
P ₂₅	35	25	121	55	0.76	11 000	7 680	3 060
P ₂₈	47	18	53	48	2.09	600	24 000	16 000
P ₃₀	52	20	153	62	1.05	1 000	9 600	420
P ₃₂	67	20	98	40	0.93	1 800	5 680	6 760
Moyenne	40	20,2	81,4	46,4	1,2	6 175	7 158	5 520

Les valeurs limites recommandées par l'Organisation Mondiale de la santé (OMS) pour l'irrigation et la boisson sont respectivement répertoriées dans les Tab.3.

Concernant l'azote et le phosphore, quelques sites particuliers ont été choisis pour faire les mesures. Le principe de la méthode de Kjeldahl a été utilisé qui consiste à convertir l'azote organique en azote ammoniacal et le phosphore organique en orthophosphates, par digestion à l'acide sulfurique auquel on ajoute du sulfate de potassium pour élever le point d'ébullition à 345-370 °C. Le Tab.4 présente les résultats obtenus.

Tableau III: Valeurs Limites Pour Les Eaux D'irrigation Et De Boisson

Valeur limite	Irrigation	Boisson
pH	5.5 – 9.5	6,5-8,5
Temperature [°C]	< 30	-
Conductivité [µS/cm]	< 3000	< 400
TDS	-	600
Matière en suspension [mg/L]	50	-
Demande Chimique en Oxygène DCO [mg/L]	200	-
Demande Biologique en Oxygène [mg/L]	80	-
Azote total [mg/L]	30	-
Nitrates	-	50
Nitrites	-	3
Phosphore total [mg/L]	10	-
Phosphates	-	5
Escherichia coli (U/100ml)	1000 U/100ml	0

Tableau IV: Valeurs Des Mesures Faites Sur L'azote Et Le Phosphore

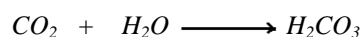
Prélèvement	Volume (NAOH)	Volume (NT) ml	Volume (PT) ml	Lecture (NT)	Lecture (PT)	(NKT) mg/L/N	(PT) mg/L/P
P ₁	4,80 ml	10	40	1,315	0,23	78,37	6,85
P ₂	5 ml	20	25	0,147	0,27	4,41	12,96
P ₇	5,10ml	10	25	0,448	0,38	30	18,3
P ₉	4,70ml	10	40	0,474	0,14	28,15	4,16
P ₂₅	4,7ml	10	35	0,067	0,25	3,98	8,48

P ₂₈	4,65ml	10	40	0,05	0,84	2,96	24,91
P ₃₀	4,40ml	10	25	0,057	0,29	3,35	13,6
Moyenne	-	-	-	-	-	21,6	12,75

3.2. Discussion

Le pH

Dans la nappe phréatique, le pH est un peu acide dans certain points (P₁, P₂ et P₃₀). En effet, les agriculteurs utilisent beaucoup de fumier de chevaux, de vaches, de volailles comme engrais pour le développement de leurs plantes. Avec la pluie et le ruissellement, l'eau de la nappe est contaminée par les déchets organiques décomposés. La baisse du pH en certains endroits est probablement due par la décomposition de la matière organique qui s'accompagne de l'acidification de l'eau interstitielle du sol donc de la nappe. Le gaz carbonique libéré pendant la décomposition de la matière organique se dissout dans l'eau de la nappe et l'acide carbonique se forme suivant l'équation :



Bien que le pH n'ait pas habituellement un impact direct sur les consommateurs, c'est un des paramètres opérationnels les plus importants de la qualité de l'eau. Il faut veiller attentivement à réguler le pH à tous les stades de traitement de l'eau pour garantir une clarification et une désinfection satisfaisantes de l'eau [22].

Pour une désinfection efficace avec le chlore, le pH devrait être de préférence inférieur à 8; cependant, une eau de pH plus faible (approximativement pH 7 ou moins) sera vraisemblablement plus corrosive. Aucune valeur guide reposant sur des arguments sanitaires n'a été proposée pour le pH.

Conductivité et salinité

La nappe a une conductivité très élevée avec une valeur moyenne de 4400 µS/cm (Tab.1). Or, La valeur limite de la conductivité est de 3000 µS/cm pour les eaux destinées à l'irrigation et 400 µS/cm pour l'eau de boisson. En effet, dans les cours d'eau et les lacs, la conductivité est affectée par divers facteurs tels que le type de sol, la roche mère et la présence de solides inorganiques dissous. Les eaux usées pourraient augmenter la conductivité en raison de la présence de chlorure, de phosphate et de nitrate [23]. C'est pour cette raison que les sites P₂₅ et P₃₂ proche de la station d'épuration (STEP) ont les plus grandes valeurs. La conductivité est sensible aux variations des solides dissous principalement des sels minéraux. Les sels accumulés dans les sols peuvent être mobilisés par l'irrigation (fractions de lixiviation), transportés par l'eau de drainage, et causent la salinisation des masses d'eau réceptrices. En outre, une irrigation excessive peut augmenter le niveau des nappes phréatiques provenant d'aquifères salins, ce qui peut augmenter l'infiltration d'eaux souterraines salines dans les cours d'eau et en augmenter la salinisation. L'intrusion d'eau salée dans les nappes aquifères est une autre cause majeure de salinisation des ressources en eau dans les zones côtières. Cette intrusion est souvent le résultat d'un prélèvement excessif des eaux souterraines [24]. Les eaux fortement salines altèrent les cycles géochimiques avec d'autres éléments majeurs tels que le carbone, l'azote, le phosphore, le soufre, la silice et le fer [25], avec une incidence globale sur les écosystèmes. La salinisation peut affecter le biote d'eau douce à trois niveaux : i) des changements au sein des espèces ; ii) des changements dans la composition de la communauté, et iii) éventuellement la perte de la biodiversité et la migration. En général, lorsque les concentrations de salinité augmentent, on observe un recul de la biodiversité (y compris des microorganismes, des algues, des plantes et des animaux) [26].

Oxygène dissous

L'oxygène est essentiel à toutes les formes de vie aquatique, y compris les organismes responsables des processus d'autoépuration dans les eaux naturelles. La teneur en oxygène des eaux naturelles varie avec la température, la salinité, la turbulence, l'activité photosynthétique des algues et des plantes, et la pression atmosphérique [27]. Un appauvrissement en oxygène dissous des

approvisionnements en eau peut stimuler la réduction microbienne des nitrates en nitrites et des sulfates en sulfures. Aucune valeur guide reposant sur des arguments sanitaires n'est recommandée. Cependant, des niveaux très élevés d'oxygène dissous peuvent stimuler la corrosion des tuyaux métalliques.

Les matières en suspension MES et TDS

Elles représentent, la fraction constituée par l'ensemble des particules, organiques ou minérales, non dissoutes de la pollution [28]. Ce sont des particules de matière organique ou minérale, non décantées et qui restent donc en suspension dans l'effluent. A l'exception de P₃₀, les eaux de la nappe ont des valeurs de MES inférieures à la limite (50 mg/L) pour une utilisation agricole avec une moyenne de 40 mg/L (Tab.2).

En outre, les matières solides totales dissoutes (TDS) comprennent des sels inorganiques (principalement calcium, magnésium, potassium, sodium, bicarbonates, chlorures et sulfates) et de petites quantités de matières organiques qui sont dissoutes dans l'eau. Les TDS présentes dans l'eau de boisson proviennent de sources naturelles, d'eaux d'égouts, de ruissellements urbains et d'eaux usées industrielles. La saveur de l'eau dont le niveau de matières solides totales dissoutes (TDS) est inférieur à environ 600 mg/L est généralement considérée comme bonne ; l'eau de boisson devient significativement et progressivement imbuvable quand les niveaux de TDS dépassent environ 1000 mg/L. Ici, les concentrations sont très élevées avec une moyenne de 3200 mg/L (Tab.1). On ne dispose pas de données fiables sur les possibles effets sanitaires de l'ingestion de TDS dans l'eau de boisson et aucune valeur guide reposant sur des arguments sanitaires n'est proposée [29].

Demandes biologique et chimique en oxygène (DBO et DCO)

La demande biologique en oxygène DBO est la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation des matières organiques biodégradable (en générale inférieur à la valeur de la DCO). C'est une mesure de la pollution organique de l'eau qui peut être dégradée biologiquement [30]. La teneur en matières organiques biodégradables est déterminée indirectement par la mesure de la quantité d'oxygène consommée, à 20°C et à l'obscurité, par les bactéries aérobies de l'échantillon. Dans un milieu nettement pollué, de faibles valeurs de DBO₅ peuvent être liées à la présence d'éléments toxiques inhibiteurs.

La demande chimique en oxygène (DCO) est une mesure de l'équivalent en oxygène de la matière organique dans un échantillon d'eau susceptible d'être oxydé par un oxydant chimique puissant, tels que le dichromate de potassium [K₂Cr₂O₇] ou le permanganate de potassium [KMnO₄] [31].

En effet, des quantités relativement élevées de carbone organique biodégradable combinées à des températures élevées de l'eau et à de faibles concentrations résiduelles de chlore peuvent permettre la croissance d'agents pathogènes tels que Legionella, Vibrio cholerae, Naegleria fowleri, Acanthamoeba et d'organismes nuisibles dans certaines eaux de surface et dans l'eau de distribution [32]. Les résultats concernant la nappe phréatique ne révèlent pas une pollution critique pour l'irrigation. Mais, la période d'après hivernage (Octobre, novembre) qu'on a effectué nos mesures peut justifier cela. En effet, la pluie dilue l'eau de la nappe donc diminue les concentrations des paramètres physico-chimiques et microbiologiques.

Paramètres microbiologiques

Les bactéries indicatrices fécales (FIB) telles qu'Escherichia coli (E. coli) [33] sont l'un des paramètres de pollution affectant plus la qualité de l'eau traitée par la station. La présence d'E. coli dans de l'eau indique une contamination récente par des matières fécales, et peut indiquer la présence possible de pathogènes responsables de maladies comme des bactéries, des virus et des parasites. Les concentrations en E. coli trouvées dans la nappe dépassent largement les normes d'utilisation dans l'agriculture (1000 U/100mL selon l'OMS) avec en moyenne 6175 U/100mL dans la nappe phréatique. P₁ et P₂ présentent respectivement 10000 U/100mL et 9000 U/100mL. P₂₅ point situé près de la station de traitement est contaminé avec une valeur de 11000 U/100mL en E. coli. Le point P₉ avec 13000 U/100mL représente le point de la nappe phréatique avec une plus grande quantité de E. coli (Tab.2). En effet, la quantité de boue non traitée utilisée comme engrais organiques dans la zone environnante de la station ont contribué davantage à contaminer le sol et donc la nappe phréatique par les E. coli. En outre, les concentrations d'E. coli dans les cours d'eau sont influencées de façon significative par les zones recevant du fumier, des terres humides, des terres drainées et des terres cultivées [34]. Par ailleurs, les Entérocoques et les Colichromes ont des valeurs moyennes de 7158 U/100mL et 5520 U/100mL respectivement.

La présence d'E. coli apporte la preuve incontestable d'une contamination fécale récente et ce micro-organisme doit être totalement absent de l'eau de boisson. En fait, les sérotypes EHEC, tels que E. coli O157:H7 et E. coli O111, provoquent une diarrhée qui va de modérée et non sanglante à très sanglante, et qui ne peut être distinguée d'une colite hémorragique. [35]. Dans certaines situations, des indicateurs supplémentaires, tels que des bactériophages ou des spores bactériennes, peuvent être utilisés. Cependant, d'autres études avaient montré que les entérobactéries peuvent migrer jusqu'à 60 cm de profondeur en saison sèche [36], alors qu'en saison pluvieuse, elles ont été détectées à 280 cm de profondeur [37]. Par ailleurs, l'eau de pluie peut accroître considérablement le niveau de contamination microbienne des eaux de source, et des flambées de maladies véhiculées par l'eau peuvent se manifester à la suite de précipitations. L'interprétation des résultats analytiques doit tenir compte de ces éventualités. En plus, des agents pathogènes transmis par l'eau, tels que Legionella, peuvent proliférer dans l'eau, tandis que d'autres, dépendant de leurs hôtes, tels que des norovirus et Cryptosporidium, ne peuvent proliférer dans l'eau mais bien y persister [1].

Azote total Kjeldahl et phosphore total

Les nitrates constituent un bon indicateur de pollution organique car la minéralisation de l'azote organique peut aboutir à la formation d'ions nitrates (par oxydation) en passant par des étapes intermédiaires (ammonium et nitrites). La contamination de la nappe par l'azote total en certains endroits (P₁, P₇ et P₉) s'explique par l'apport massif d'engrais chimique et organique (Tab.4). Le Tab.2 montre aussi des valeurs de nitrates des points P₁, P₂₅ et P₃₀ supérieures à 50 mg/L la limite de l'OMS pour les eaux de boisson. En effet, P₂₅ et P₃₀ sont proche de la STEP. Le phosphore est relativement élevé dans la nappe avec une moyenne de 12,5 mg/L alors que la limite pour l'irrigation est de 10 mg/L et celle de l'eau de boisson est de 5 mg/L de phosphates. Cette contamination par l'azote et le phosphore est probablement due au fait que, dans la zone du Technopole, les agriculteurs utilisent pratiquement les engrais organiques de l'ensemble des animaux domestiques : vache, cheval, volaille. En outre, l'ensemble des agriculteurs interrogés utilisaient également les engrais chimiques NPK 10-10-20, le 9-23-30 Urée-P-K, le 18-46 urée-P, nitrate de potassium, sulfate de potasse. Ces pratiques favorisent le lessivage des sols par les engrais chimiques. Par ailleurs, la nappe de Pikine a été classée dans la zone à nappe phréatique très vulnérable avec des quantités de nitrate de 100 à 550 mg/L [19]. En effet, plusieurs études ont montré que le véritable problème lié à l'agriculture est la contamination de la nappe par les composés azotés provenant soit des eaux usées et/ou des engrais, surtout en période pluvieuse [38]. Dans le sol, les engrais azotés inorganiques et les déchets contenant de l'azote organique sont d'abord décomposés en ammoniac, qui est ensuite oxydé en nitrite et en nitrates. Les nitrates sont absorbés par les plantes lors de leur croissance et utilisés dans la synthèse de composés azotés organiques. Les nitrates en excès sont rapidement entraînés par les eaux souterraines [39], [40]. En conditions aérobies, des quantités considérables percolent dans l'aquifère car ils sont très peu dégradés et dénitrifiés. En conditions anaérobies, les nitrates peuvent être presque complètement dénitrifiés ou dégradés en azote. Le niveau plus ou moins élevé de la nappe phréatique, la pluviométrie, la présence d'autres substances organiques et d'autres facteurs physico-chimiques influent aussi beaucoup sur le destin de nitrates dans le sol [41]. Associés aux phosphates, les nitrates favorisent la croissance parfois exagérée de la flore aquatique, pouvant ainsi entraîner une eutrophisation des fleuves et des lacs. C'est ainsi que ce milieu où la végétation est très développée avec la prolifération des algues et les plantes aquatiques telles que le Typha, le roseau (Fig. 5). En effet les impacts négatifs du Typha sur l'agriculture, la pêche, l'élevage, la santé des populations et sur la biodiversité sont néfastes.



Fig. 5 : Prolifération d'algues dans la nappe phréatique (P₉)

Il faut rappeler aussi qu'une eau contenant des teneurs excessives en nitrates peut provoquer chez les consommateurs (enfants) la méthémoglobinémie qui correspond à l'oxydation de l'hémoglobine sanguine en méthémoglobine incapable d'assurer le transport de l'oxygène sanguin vers les tissus.

Ainsi, le cycle de l'eau, également appelé cycle hydrologique, correspond à l'échange continu d'eau entre la terre, les masses d'eau et l'atmosphère. Lorsque la pluie tombe sur le sol, alors elle peut s'évaporer, s'infiltrer dans le sol ou devenir de l'eau de surface. Les surfaces imperméables associées à l'urbanisation modifient la quantité d'eau naturelle. Les conséquences de ce changement sont une diminution du volume d'eau qui s'infiltrer dans le sol, une augmentation du volume et une diminution de la qualité de l'eau de surface correspondant aux inondations dans cette localité. Ces changements hydrologiques ont des conséquences importantes sur la quantité d'eau douce et propre pouvant être utilisée par les humains, les poissons et les espèces sauvages. Les flambées de maladies transmises par l'eau peuvent affecter un grand nombre de personnes et la première priorité dans l'élaboration et l'application de mesures destinées à préserver la qualité de l'eau de boisson devrait être la lutte contre ces flambées.

IV. CONCLUSION

Au terme de ce travail, une évaluation de la qualité des eaux souterraines dans la zone du Technopole a été réalisée pour étudier son utilisation pour l'irrigation et la boisson afin de diminuer les inondations très fréquentes dans cette localité. Les résultats de cette étude montrent que la qualité des eaux de la nappe du Technopole est assez bonne pour l'irrigation mais très mauvaises pour la consommation humaine. A l'exception de la conductivité (en moyenne 4400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ > 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ valeur guide de l'OMS) et du phosphore total (en moyenne 12,75 mg/L > 10 mg/L valeur guide de l'OMS), tous les autres paramètres des eaux souterraines respectent les valeurs limites de l'OMS pour l'irrigation. Par contre, pour les paramètres de potabilité mesurés, il n'y a que les nitrates qui respectent la limite qui est de 50 mg/L dans certains points avec une moyenne de 46,4 mg/L. Ainsi, nous avons des milliers d'E. coli dans 100 mL alors qu'il devrait être absent dans les eaux destinées à la boisson. Par ailleurs, nous avons aussi des concentrations de TDS très élevées pour la boisson avec une moyenne de 3200 mg/L alors qu'elle est généralement considérée comme bonne si c'est inférieur à 600 mg/L. Cette pollution est directement liée aux rejets des eaux usées de la STEP et aux activités agricoles mais également entretenue par une mauvaise gestion des eaux usées dans la zone. Par conséquent, la non utilisation de l'eau de la nappe du Technopole, réduit le pourcentage d'eau absorbée par le sol et augmente le pourcentage d'eau qui reste en surface avec de mauvaises qualités correspondant aux inondations très fréquentes dans cette localité. Cependant, une étude complémentaire est nécessaire pour vérifier aussi la présence ou pas des métaux lourds et/ou des pesticides dans la nappe du Technopole afin de proposer un traitement adéquat de l'ensemble des contaminants.

V. REMERCIEMENTS

Je remercie vivement pour le soutien du laboratoire de recherche sur les technologies appropriées pour la gestion de l'environnement dans les pays à revenu faible et intermédiaire (CeTAmb) de l'université de Brescia, l'Office Nationale de l'Assainissement du Sénégal (ONAS) et avec la collaboration de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

REFERENCES

- [1] Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality: 4th ed. incorporating first addendum]. Genève : OMS, 2017. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- [2] Smith, K, Corvalán, C & Kjellstrom, T. How much global ill health is attributable to environmental factors. *Epidemiology* 10(5):573-84, 1999. DOI: 10.1097/00001648-199909000-00027
- [3] World Health Organization (WHO). The World health report - reducing risks, promoting healthy life. Geneva, WHO, 2002.
- [4] World Health Organization (WHO). Preventing Diarrhoea through Better Water, Sanitation and Hygiene: Exposures and Impacts in Low- and Middle-income Countries. Genève, Suisse, WHO, 2014. apps.who.int/iris/bitstream/10665/150112/1/9789241564823_eng.pdf
- [5] Montgomery, M, et al, eds. *Cities transformed: demographic change and its implications in the developing world*. London, Earthscan, 2004.
- [6] Health Effects Institute. *Health effects of outdoor air pollution in developing countries of Asia; a literature review*. Boston, 2004.
- [7] DFID, EC, UNDP, and World Bank. *Linking Poverty Reduction and Environmental Management - Policy Challenges and Opportunities*. The World Bank, Washington, D.C, 2002.

- [8] Agence National de la Statistique et de la Démographie (ANSD). Situation économique et sociale du Sénégal en 2016, Ed 2019. Site web : www.ansd.sn
- [9] Agence National de la Statistique et de la Démographie (ANSD). Situation économique et social. Eau et Assainissement. Ed 2014. Site web : www.ansd.sn
- [10] WWDR Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau. Les eaux usées : une ressource inexploitée. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07-SP © UNESCO, 2017
- [11] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin III, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, F. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 2009, Vol. 14, No. 2, art. 32. www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/
- [12] Organisation mondiale de la santé (OMS). Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères - Vol. 2 : Utilisation des eaux usées en agriculture. Genève, Suisse, OMS, 2006. apps.who.int/iris/bitstream/10665/78280/3/9789242546835_fre.pdf?ua=1
- [13] Agence National de la Statistique et de la Démographie (ANSD). Situation économique et sociale de la région de Dakar de l'année 2007, 2008, 163 p.
- [14] N'diaye, A. A. Caractérisation des boues de vidange et performance de la déposante de Cambérène. Mémoire de fin d'études, EIER/2iE Dernière Promotion, 2007.
- [15] Diawara, A. B. Les déchets solides à Dakar. Environnement, sociétés et gestion urbaine. Géographie. Thèse de doctorat de l'université Michel de Montaigne-Bordeaux III. Français, 2009.
- [16] Agence National de la Statistique et de la Démographie (ANSD). Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'agriculture et de l'élevage. Rapport definitive de l'année 2013, 2014.
- [17] Badiane, S. D., Diouf, E., M'baye, E. Le Technopôle de Dakar, une zone humide dans l'agglomération dakaroise. Perception et perspectives de valorization. Département de géographie, UCAD- Dakar, Section de géographie, UGB-Saint-Louis, 2017.
- [18] Diouf, O.C., Faye, S.C., Diédhiou M., Faye S., Faye, A. et Wohnlich, S. Urban impact in Groundwater Levels in Dakar Shallow Aquifer (SENEGAL). *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*, Volume 1, October 2013, Issue 4: 37-43.
- [19] Faye, S. C., Faye, S., Wohnlich, S., Gaye, C. B. An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal). *Environmental Geology*, 2004, 45:312–322.
- [20] Gaye, M. et Niang, S. Epuration extensive des eaux usées pour leur réutilisation dans l'agriculture urbaine : des technologies appropriées en zone sahélienne pour la lutte contre la pauvreté. *Enda tiers-monde*, Dakar, 2002.
- [21] Ndao, M. Dynamiques et gestions environnementales de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal : étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (à Dakar), Mboro (à Thiès et Saint-Louis). Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, France, 2012.
- [22] Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Rapport sur les contaminants microbiens et la croissance des microorganismes dans les réseaux de distribution et sur les pratiques qui contribuent à garantir la sécurité sanitaire de l'eau de boisson dans les réseaux de distribution canalisés, 2004. IWA Publishing. http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/safe-piped-water/en/.
- [23] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Available online: <http://water.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms511.cfm>. Accessed on 17 January 2017.

- [24] Mateo-Sagasta, J. & Burke, J. Agriculture and water quality interactions: a global overview. SOLAW Background Thematic Report-TR08. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010.
- [25] Herbert Ellen R., Paul Boon, Amy J. Burgin, Scott C. Neubauer, Rima B. Franklin, Marcelo Ardón, Kristine N. Hopfensperger, Leon P. M. Lamers, Peter Gell. A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*, Volume 6, Issue10, October 2015, Pages 1-43. <https://doi.org/10.1890/ES14-00534.1>.
- [26] Lorenz, F. - A new species of *Morum* from the Western Indian Ocean (Gastropoda: arpidae). *Conchylia*, 2014, **44(3-4)**:2-5.
- [27] Chapman, D. *Water Quality Assessments—A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1996. [Google Scholar]
- [28] Said, M. M. Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées, par des procédés mixtes. Cas de la STEPT de la ville de Tizi-Ouzou. Thèse de doctorat de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2012.
- [29] Organisation mondiale de la santé (OMS). Total dissolved solids in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality. Genève, Organisation mondiale de la Santé, 2003. (WHO/SDE/WSH/03.04/16.).
- [30] Nagel, B., Dellweg, H., Gierasch, L.M. Glossary for chemists of terms used in biotechnology (IUPAC recommendations 1992). *Pure Appl. Chem.* 1992, 64 (1), 143-168
- [31] Li, J., Luo, G., He, L., Xu, J. and Lyu, J. Analytical Approaches for Determining Chemical Oxygen Demand in Water Bodies: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2018, 48:1, 47-65, DOI: 10.1080/10408347.2017.1370670.
- [32] Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Évaluation du rôle de la détermination du nombre de bactéries hétérotrophes dans la gestion de la sécurité sanitaire de l'eau de boisson. IWA Publishing, 2003. http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/hpc/en/.
- [33] Brendel, C. and Soupir, M. L. Relating Watershed Characteristics to Elevated Stream *Escherichia coli* Levels in Agriculturally Dominated Landscapes: An Iowa Case Study. *Water*, 2017, 9, 154; doi:10.3390/w9030154
- [34] Pandey, P.K., Soupir, M.L., Haddad, M., Rothwell, J.J. Assessing the impacts of watershed indexes and precipitation on spatial in-stream *E. coli* concentrations. *Ecological Indicator*, 2012, 23, 641–652. [CrossRef]
- [35] Nataro JP, Kaper JB. Diarrheagenic *Escherichia coli*. *Clinical Microbiology Reviews*, 1998, 11:142–201.
- [36] N'diaye, A. A. Caractérisation des boues de vidange et performance de la déposante de Cambéréne. Mémoire de fin d'études, EIER/2iE Dernière Promotion, 2007.
- [37] Félix, J. Caractérisation des eaux d'arrosage, de leurs impacts sur l'environnement et techniques d'épuration extensive par lagunage (Dakar, Sénégal). Diplôme en Sciences Naturelles de l'environnement. Université de Genève et Lausanne. Mémoire N° 121, pp. 121, 2006.
- [38] Majdoub, R., Côté, C., Labidi, M., Guay, K. & Généreux, M. Impact de l'utilisation des engrais de ferme sur la qualité microbiologique de l'eau souterraine. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, pp. 136, 2003.
- [39] Van Duijvenbooden W., Matthijsen AJCM. Integrated criteria document nitrate. Bilthoven, Pays-Bas, Institut national de santé publique et de protection de l'environnement (Rapport N° 758473012), 1989.
- [40] United States Environmental Protection Agency : Office of Drinking Water. Estimated national occurrence and exposure to nitrate and nitrite in public drinking water supplies. Washington, DC, 1987.
- [41] Van Duijvenbooden W., Loch JPG. Nitrate in the Netherlands: a serious threat to groundwater. *Aqua*, 1983, 2: 59-60.