

# DISTRIBUTION DES RESIDUS DE FER ET DE MANGANESE LE LONG DE LA COLONNE D'UNE RETENUE D'EAU EN COURS D'EUTROPHISATION : CAS DU BARRAGE DE L'OKPARA A PARAKOU AU BENIN

Dieudonné ZOGO\* Henri H. SOCLO\*\* Moctar BAWA\*\*\* Magloire GBAGUIDI\*\*

\* Société Nationale des Eaux du Bénin, 01BP 216 Cotonou, Bénin.

\*\* Unité de Recherche en Ecotoxicologie et Etude de Qualité, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi., Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin.

\*\*\* Département de Chimie/Faculté des Sciences de l'Université de Lomé.

## RÉSUMÉ

La retenue d'eau de l'Okpara est la source utilisée par la SONEB (Société Nationale des Eaux du Bénin) pour alimenter en eau potable la ville de Parakou et ses contrées environnantes. Ce plan d'eau, d'une profondeur variable de 4,5 à 8 mètres selon les saisons, est situé au nord du Bénin sous un climat tropical sec et présente des signes d'eutrophisation notamment la prolifération exponentielle de macrophytes aquatiques et la présence de fer et de manganèse; lesquels métaux rendent parfois difficile le traitement de l'eau brute pour produire de l'eau potable. Cette eutrophisation est due à la pratique de culture intensive de coton dans le sous bassin versant de cette retenue consommant d'importantes quantités d'engrais chimiques.

La présente étude a été menée durant la période allant de 2003 à 2006. Les campagnes de prélèvements d'eau et de mesures physico-chimiques ont été effectuées autour de l'ouvrage de prise d'eau brute où la colonne d'eau est la plus profonde. Les teneurs de fer et de manganèse ont été mesurées par spectrophotométrie d'absorption UV Visible aux longueurs d'onde respectives de 510 et 436 nm. En période de basses eaux, des accroissements concomitants des concentrations des deux métaux ont été observés de la surface vers le fond de la retenue, pendant que décroissaient les teneurs de l'oxygène dissous. Les faibles valeurs du pH et de l'alcalinité de l'eau au niveau de l'hypolimnion caractérisé par de fortes concentrations en fer et en manganèse et une absence quasi-totale de l'oxygène dissous pendant la saison sèche font conclure à une prédominance des formes dissoutes du fer et du manganèse dans la colonne d'eau au contact des sédiments. Par contre, en saison de hautes eaux, les teneurs des deux métaux sont faibles et uniformément réparties de l'épilimnion à l'hypolimnion sous les formes oxydées.

En outre, il a été noté une augmentation continue des taux de fer et de manganèse à la surface de l'eau d'année en année, due à un possible relargage des métaux de sources endogènes et qui se traduit par une forte poussée de plantes aquatiques envahissant l'ensemble de la retenue. Ainsi, les altérations régulières et répétées des propriétés organoleptiques de l'eau de la retenue engendrées par les phénomènes décrits ont longtemps fait peser de graves soupçons sur la qualité de l'eau distribuée par la SONEB aux populations de Parakou.

Grâce aux résultats de la présente étude, la situation a pu être contrôlée en suggérant entre autres solutions, l'enlèvement des plantes aquatiques pour réduire leurs interactions potentielles avec les métaux, ainsi que l'installation d'une pompe flottante de type hydro mobile dont la fonction est de prélever en permanence l'eau brute à un niveau proche de l'interface eau-atmosphère.

**Mots clés :** Fer, manganèse, colonne d'eau, retenue, oxygène dissous, eutrophisation.

## ABSTRACT

DISTRIBUTION OF IRON AND MANGANESE RESIDUE ALONG WATER COLUMN IN AN EUTROPHICATING LAKE: CASE STUDY OF THE OKPARA LAKE AT PARAKOU CITY IN BENIN

The water reserve of Okpara is the source used by the SONEB to supply out of drinking water the town of Parakou and the surrounding regions. This surface water, with 4.5-8 meters depth according to seasons, is located in the north of Benin Republic under a dry tropical climate, and exhibits the signs of eutrophication due in great part to the presence of iron and manganese; which metals makes sometimes difficult the rough water treatment to provide drinking water.

The present study was conducted during the period from 2003 to 2006. The campaigns of water samplings and physico-chemical measurements were carried out around the SONEB rough water collecting point, where the water column is the deepest one. Manganese and iron contents were measured by UV absorption spectrophotometric technique with the respective wavelengths of 510 and 436nm. During the low waters periods, concomitant increases in the concentrations of

the two metals were observed from the surface to the bottom of the water column, while the contents of dissolved oxygen were decreasing. The low values of the pH and the alkalinity of water in the hypolimnion, characterized by high manganese and iron concentrations and a quasi-total absence of dissolved oxygen during the dry season, show a prevalence of the dissolved forms for iron and manganese in the water column in touch with the sediments. On the other hand, during the high waters season, the contents of the two metals are low and uniformly distributed from epilimnion to hypolimnion zones, in the oxidized forms.

Moreover, it was noted a continuous increase in the manganese and iron rates at the surface from year to year, probably which had with a possible salting out of metals of endogenous sources and which results in an exponential proliferation of macrophytes invading the whole of reserve. It is resulted from it a deterioration from the organoleptic properties of the water, which a long time let weigh serious suspicions on the quality of the water distributed by the National Company of Water of Benin (SONEB) in Parakou. Thanks to the results of this study, the situation could be controlled while suggesting inter alia, the removal of the aquatic plants to reduce their potential interactions with metals, as well as the installation of a hydromobile type floating pump whose function is to permanently take raw water on a level close to the water-atmosphere interface.

**Keywords :** *Iron, manganese, water column, dam, dissolved oxygen, eutrophication.*

## 1. INTRODUCTION

Le fer est l'un des métaux les plus abondants de la croûte terrestre (Levesque, 1980). Il est présent dans l'eau sous trois formes : le fer ferreux  $Fe^{2+}$ , le fer ferrique  $Fe^{3+}$  et le fer complexé à des matières organiques (acides humiques, fulviques, tanniques, ...) et minérales (silicates, phosphates, ...) (Olivier, 2005). Dans les eaux bien aérées, le fer ferreux est oxydé en fer ferrique qui précipite sous forme d'hydroxyde,  $Fe(OH)_3$ .

La présence du fer dans l'eau provient principalement du lessivage des sols, avec dissolution des roches et minerais, des rejets industriels, de la corrosion des canalisations métalliques, et de l'utilisation de sels ferriques comme coagulants au cours du traitement de l'eau (Levesque, 1980). Quant au manganèse, selon le même auteur, il est présent en quantité moindre que le fer, dans les roches. Son origine dans l'eau vient essentiellement de la dissolution des roches, et d'éventuels rejets industriels.

Le fer et le manganèse sont des éléments nutritifs essentiels. A de très petites doses, ils ne sont pas en eux-mêmes directement nuisibles à l'homme (MASSCHELEIN, 1996). Il est important cependant d'en contrôler les concentrations pour des raisons d'esthétique (DESJARDINS, 1997) afin d'éviter les effets induits de leur présence dans l'eau de consommation notamment : la perte des propriétés organoleptiques (goût métallique, couleur rougeâtre, etc.), les taches sur le linge et sur les équipements sanitaires, la neutralisation du chlore résiduel nécessaire à la sécurisation de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution.

Le fer contribue également à la prolifération de certains microorganismes comme *Crenothrix sp.*, *Leptothrix lopholea*, *Gallionella ferruginea*, *Siderocapsa vulgaris*, *Sphaerotilus*, *Thiobacillus ferroxidans* (Rebuchaman et Gebbons in Masschelein) qui vivent dans des amas de minéraux précipités, ce qui rend leur détermination particulièrement difficile. Ces bactéries se développent en masses gélatineuses et rétrécissent le diamètre utile des conduites

(LERCLERC et MOSSEL, 1989). Elles créent des pertes de charge lors de l'écoulement. Le régime d'écoulement change dans les conduites, et ces protubérances peuvent être arrachées et provoquer l'augmentation de la turbidité ainsi que l'altération de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux dans les réseaux de distribution (RODIER, 1978).

Sur le plan toxicochimique, le manganèse peut être toxique à forte dose et causer de graves problèmes de santé (Santé Canada, 2001). A partir d'une concentration de 0,05mg/L dans l'eau, le manganèse génère sous l'action bactérienne, des précipités noirs légèrement gluants, précurseurs du mauvais goût, de l'odeur et de la turbidité dans les conduites d'eau potable (DESJARDINS, 1997). Les symptômes de l'intoxication par le manganèse comprennent, entre autres, l'irritation, les troubles de la mémoire, l'anorexie et l'apathie, suivies notamment de maladresse, de tremblements musculaires et de trouble de la démarche (Santé Canada, 2001).

La présente étude sur la retenue de l'Okpara à Parakou fait suite aux fréquentes plaintes des consommateurs dénonçant une possible dégradation des propriétés organoleptiques (couleur, goût) de l'eau de boisson fournie par la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB). Elle vise à : i) caractériser l'eau de la retenue, surtout au niveau de la tour de prise, sur le plan physico-chimique ; ii) suivre l'évolution des taux de fer et de manganèse en fonction de la profondeur, car la prévalence de ces métaux dans l'eau peut influencer sur ses propriétés organoleptiques.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. CADRE D'ÉTUDE

L'Okpara est une rivière totalement située dans le Département du Borgou et prend sa source à Pèrèrè (fig.1). C'est un affluent de l'Ouémé, présentant un débit irrégulier variant entre 0,0001 et 150m<sup>3</sup>/s (SBEE, 1990). Il mesure

Mois	J	F	Ma	A	Mi	Jn	Ju	Ao	S	O	N	D	Total
Année													
<b>2003</b>	2	2	3	3	4	4	3	2	1	2	2	2	<b>30</b>
<b>2004</b>	1	1	2	2	3	2	2	1	2	1	2	4	<b>23</b>
<b>2005</b>	1	2	1	3	2	2	1	1	1	1	1	1	<b>17</b>
<b>2006</b>	2	1	2	2	3	2	1	1	1	1	1	1	<b>18</b>
<b>Total</b>	6	6	8	10	12	10	7	5	5	5	6	8	<b>88</b>

Tableau I – Le point des campagnes d'échantillonnage de 2003 à 2006.

362 km environ de long avec une superficie totale de 10.000 km<sup>2</sup> (Lebarbe, 1993). Son bassin versant, d'une superficie de 2.070 km<sup>2</sup>, couvre en grande partie les communes de Pèrèrè à l'est, de Nikki au nord est, de N'dali à l'ouest, de Parakou et de Tchaourou au sud et enfin une petite partie de la commune de Bembèrèkè au nord. Ces zones sont reconnues pour la pratique de la culture intensive de coton, avec son corollaire, l'utilisation importante d'insecticides et d'engrais chimiques de synthèse.

Le captage d'eau brute sur le cours de la rivière Okpara se

fait grâce à la retenue d'eau située sur la rivière à environ 13,5km à l'est de Parakou. Cette retenue a été construite en 1969 pour servir à l'approvisionnement en eau à la société SODAK qui s'occupait de la culture et de la transformation du kénaf. A partir de 1973, la retenue a été prise en charge par l'ex SBEE (Société Béninoise d'Electricité et d'Eau) pour l'alimentation en eau potable de la ville de Parakou. Elle a un volume de 5,75 millions de m<sup>3</sup> au niveau du déversoir supérieur, et quand elle est remplie elle couvre une superficie de 190 ha. Sa longueur maximale est de 15

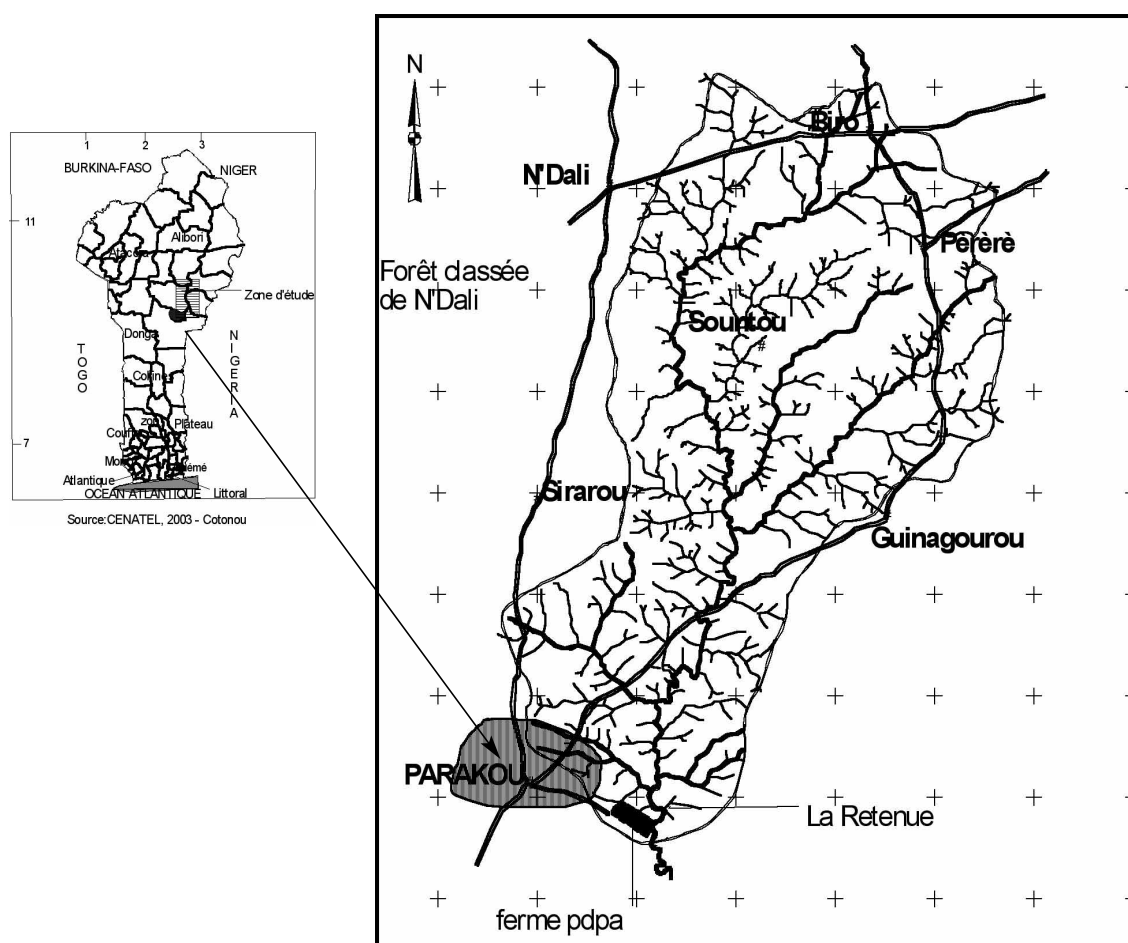


Figure 1 : Carte de situation de la zone d'étude (CENATEL et DGH, 2003).

km. En saison de hautes eaux (de juin à octobre), la profondeur est de 8 m et elle revient à 4,5 m en période de basses eaux (de novembre à mai). La profondeur de 4,5 m n'est dépassée alors qu'en saison pluvieuse caractérisée par l'homogénéisation de la colonne d'eau, et où l'eau atteint le hauteur maximum de 8 mètres dans la retenue.

Le barrage de l'Okpara est construit en latérite imperméable, sans noyau d'étanchéité en direction nord-sud sur une longueur de 480 m avec une hauteur maximum de 10mètres. Il ne dispose pas d'un évacuateur de fond. Sa crête est revêtue d'asphalte sur une largeur d'à peu près 7 m (SBEE, 1990). Deux ouvrages en béton situés sur la partie sud de la digue et distants de 50 m servent d'évacuateurs de crue. Au niveau de l'évacuateur auxiliaire, la crête est constituée d'une bordure en béton. Un pont érigé sur la digue principale du barrage sert de passage aux piétons, cyclistes, camions et voitures. Le niveau d'eau dans la retenue est contrôlé au moyen des déversoirs réglables à l'aide de batardeaux mobiles en acier.

## 2.2. MATÉRIEL

### 2.2.1. Prélèvements d'échantillons d'eau

Le tableau 1 fait le bilan des campagnes d'échantillonnage durant la période 2003-2006. Selon le plan d'échantillonnage, 88 campagnes de prélèvement ont été effectuées sur l'ensemble de la période de l'étude. A chaque campagnes plus de 15 échantillons sont prélevés le long de la colonne d'eau au niveau de la tour de prise à différentes profondeurs suivant un gradient de 25cm en saison sèche et de 50cm en saison pluvieuse. Cette stratégie a permis de suivre les évolutions des paramètres physico-chimiques de l'eau de la retenue dans le temps et au long de la colonne d'eau.

En pratique, une pompe immergée monophasée a servi à l'aspiration des échantillons d'eau à différents niveaux, soit P<sub>0</sub> (niveau 0m), P<sub>1</sub> (niveau 1m), P<sub>2</sub> (niveau 2m), P<sub>3</sub> (niveau 3m) ; P<sub>4</sub> (niveau 4m) et P<sub>4,5</sub> (niveau 4,5m), P<sub>5</sub> (niveau 5m), P<sub>5,5</sub> (niveau 5,5m), P<sub>6</sub> (niveau 6m), P<sub>6,5</sub> (niveau 6,5m), P<sub>7</sub> (niveau 7m), P<sub>7,5</sub> (niveau 7,5 m). Les échantillons ainsi prélevés dans des bouteilles colorées sont conservés au frais à 4°C sous des accumulateurs de froid dans des glacières et transportés en laboratoire. Le fer total et le manganèse total sont dosés directement sur les échantillons et le reste des échantillons est ensuite filtré dans les quatre heures suivant les campagnes d'échantillonnage, sur un tamis de 0,45µm de maille, pour éliminer les éléments particuliers, afin de doser les portions dissoutes du fer et du manganèse.

### 2.2.2. Mesures physico-chimiques

Les paramètres physicochimiques usuels (température, pH, conductivité électrique, turbidité, oxygène dissous, potentiel rédox) ont été mesurés au moyen d'appareils de terrain et/ou de laboratoire tels que : un pHmètre de type pH 340/ion SET, un conductimètre LF 340-A/SET, un turbidimètre CIFEC (HACH 2100 AN Turbidimeter) série 21446 et un oxymètre de type YSI 52.

Un spectrophotomètre DR 4000U (UV/Vis) modèle 48100, caractérisé par une gamme spectrale de 190 à 1100nm, une exactitude de ±1 nm, une répétabilité et une résolution de ± 0,1 nm avec une bande passante de 5nm a permis de faire les mesures colorimétriques. Le dosage du manganèse (Mn II) est fait par spectrophotométrie suivant la méthode NF T 90- 024 Octobre 1963 (AFNOR, 1997) tandis que le fer (Fe II et Fe III) est dosé par spectrométrie à la phénanthroline 1, 10 NF T 90- 017 Juin 1982 (AFONR, 1997).

Les données d'analyses sont traduites sous forme de courbes tendancielle grâce au logiciel excel.

## 3. RESULTATS

Les figures numérotées de 2-a à 5-c montrent l'évolution spatio-temporelle des teneurs de l'eau de la retenue de l'Okpara en fer, en manganèse et en oxygène dissous durant la période d'étude 2003-2006.

Au cours de l'année 2003, les teneurs de fer et de manganèse mesurées en période d'étiage (de novembre à mai), à différentes profondeurs de la surface au fond de la retenue de l'Okpara, varient respectivement de 0,02 à 51mg/l pour le premier métal, et de 0,02 à 5,5mg/l pour le second (fig.2-a et 2-b). En saison pluvieuse de la même année, c'est-à-dire de juin à octobre, on assiste à une chute brusque de la plus forte valeur à la plus faible (0,02mg/l) où elles se sont pratiquement stabilisées durant le reste la saison (d'août à octobre).

Concomitamment on assiste, durant l'année et à toute profondeur, à une inversion de l'évolution des teneurs de l'oxygène dissous par rapport à celle du fer et du manganèse (fig. 2-c). Les concentrations de l'oxygène décroissent très rapidement de la surface vers le fond jusqu'à s'annuler à environ 2 m pendant la période d'étiage alors que cette tendance est plus douce durant la période de crue et l'eau demeure oxygénée de l'épilimnion à l'hypolimnion. Or, au fur et à mesure que l'on descend le long de la colonne d'eau vers le fond, les taux du fer dissous et du manganèse croissent pour atteindre des valeurs supérieures à 50mg/L et 4mg/l respectivement. Cela montre une corrélation entre la présence d'oxygène dissous et la distribution du fer et du manganèse au long de la colonne d'eau dans la retenue.

En fait, la colonne d'eau est stratifiée par rapport au fer et au manganèse, et par ricochet par rapport à l'oxygène dissous. Cette stratification apparue à partir de janvier jusqu'à fin juin 2003 coïncide avec la saison d'étiage. Elle disparaît à partir de juillet 2003 jusqu'à fin octobre, période de hautes eaux, avant d'amorcer une réapparition au mois de novembre, c'est-à-dire environ un mois après la fermeture des batardeaux qui bloque la circulation des masses d'eau vers les déversoirs et entraînant l'augmentation du niveau d'eau dans la retenue. La persistance exceptionnelle de la stratification en 2003 au-delà du mois de mai vers celui de juillet est probablement due au retard qu'a connu le régime pluvial au cours de cette année.

Au cours de l'année 2004, au regard de l'évolution des courbes des figures 3-a, 3-b et 3-c, le phénomène de stratification de la colonne d'eau qui a commencé à mi-novembre 2003 s'est accentué en février 2004 pour atteindre son maximum en juin 2004. Les concentrations des deux

métaux pendant cette période de saison sèche se situent dans les gammes respectives de 0,15-38mg/L pour le fer et de 0,07-3,24mg/L pour le manganèse. Le mois de juillet marque la chute des valeurs qui deviennent totalement négligeables à partir du mois d'août où les concentrations

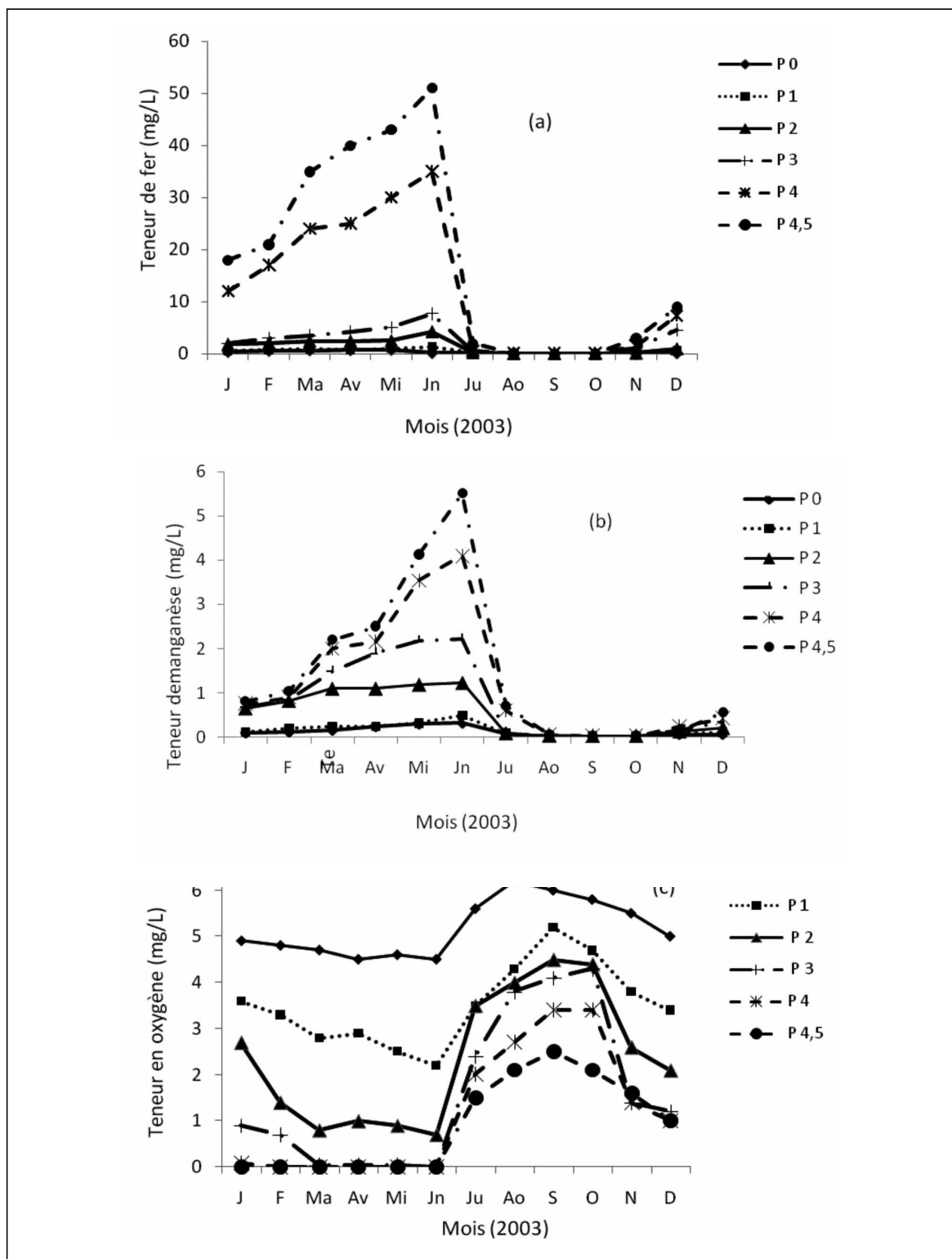


Figure 2 – Evolution des teneurs de l'eau (mg/L) en fer (a), manganèse (b), et oxygène dissous (c) en fonction de la profondeur pour l'année 2003.

des deux métaux se stabilisent à leurs plus faibles valeurs respectives avant de connaître une remontée à partir de la mi-novembre comme l'année antérieure.

La baisse des teneurs du fer et particulièrement du manganèse à partir du mois de juin 2004 provient probablement de l'opération de nettoyage du plan d'eau entreprise au début

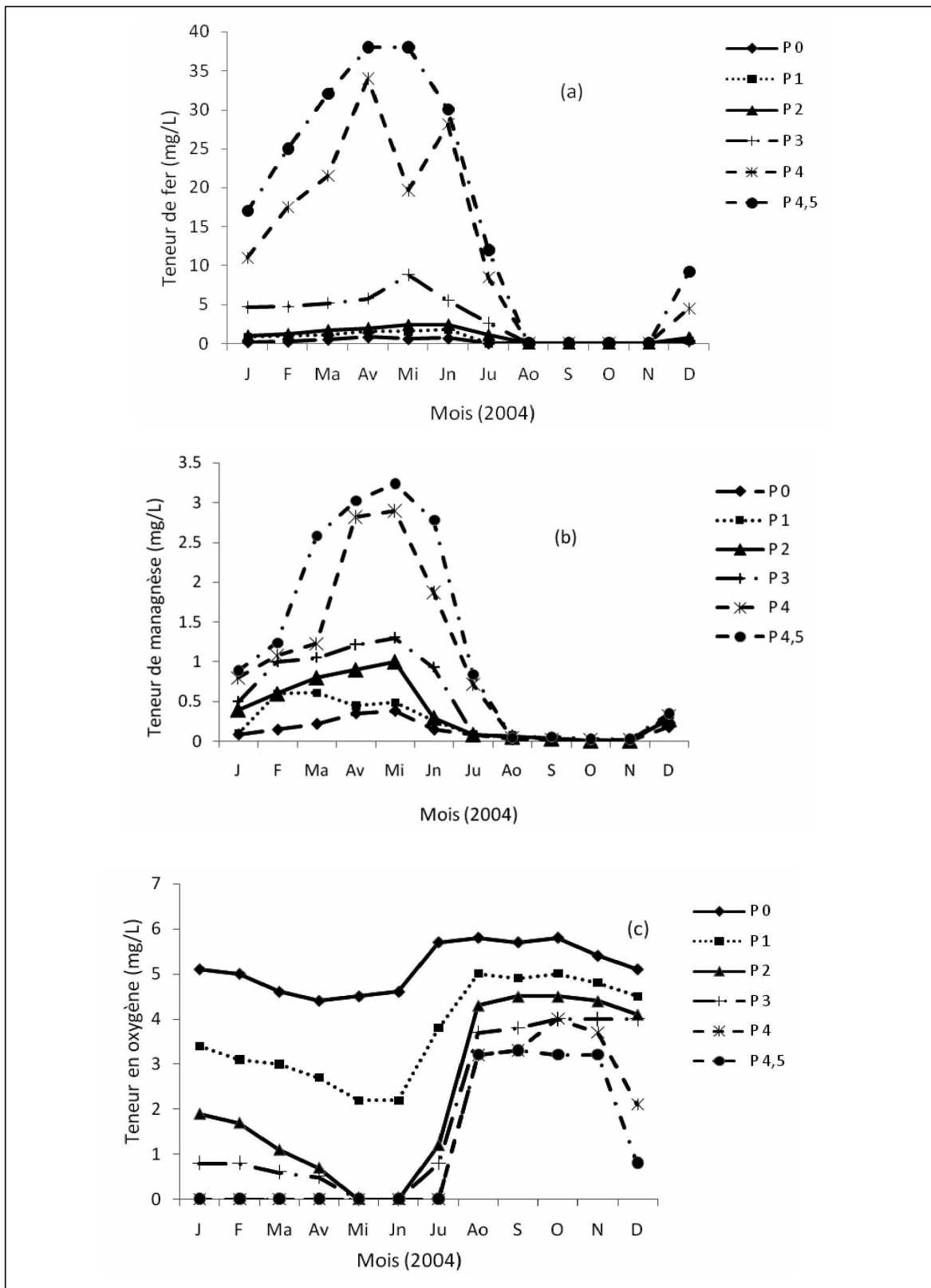


Figure 3 – Evolution des teneurs de l'eau (mg/L) en fer (a), manganèse (b), et oxygène dissous (c) en fonction de la profondeur pour l'année 2004.

de cette année par la SONEB et qui a consisté à débarrasser par ramassage manuel les plantes aquatiques colonisant la surface de la retenue. Les plantes une fois mortes contri-

buent continuellement à l'enrichissement du sédiment en matières organiques, accélérant ainsi le processus responsable de la désoxygénation de l'hypolimnion. Il est probable

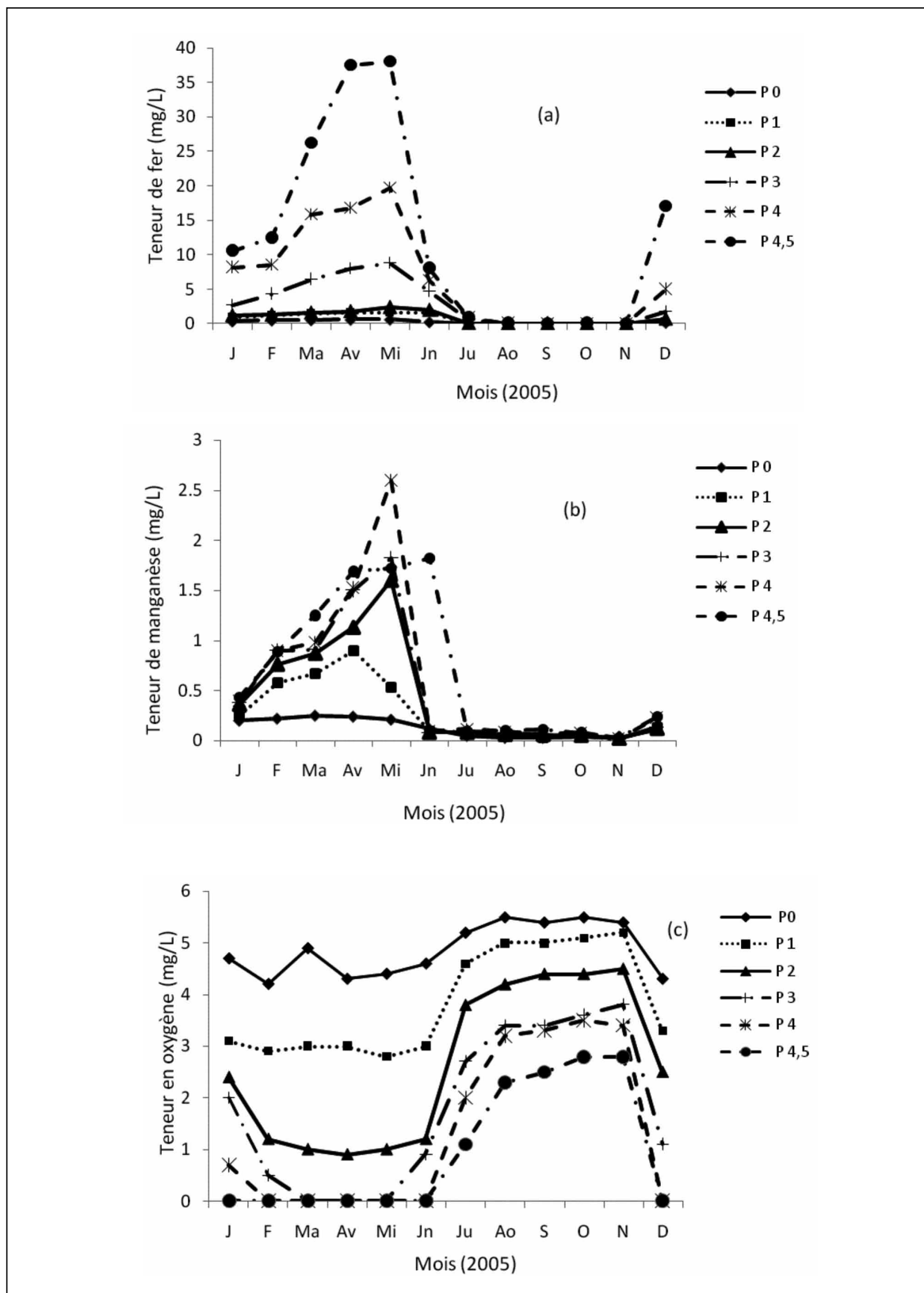


Figure 4 – Evolution des teneurs de l'eau (mg/L) en fer (a), manganèse (b), et oxygène dissous (c) en fonction de la profondeur pour l'année 2005

que certaines de ces plantes jouent un effet d'accumulateur de métaux. L'effet de l'enlèvement des plantes a été perceptible en 2005 et en 2006 (fig.4-a et fig. 5-a) où les concen-

trations de fer ont diminué au fond de la retenue en période d'été, passant de 51 mg/L en 2003 à 35mg/L en moyenne en 2006.

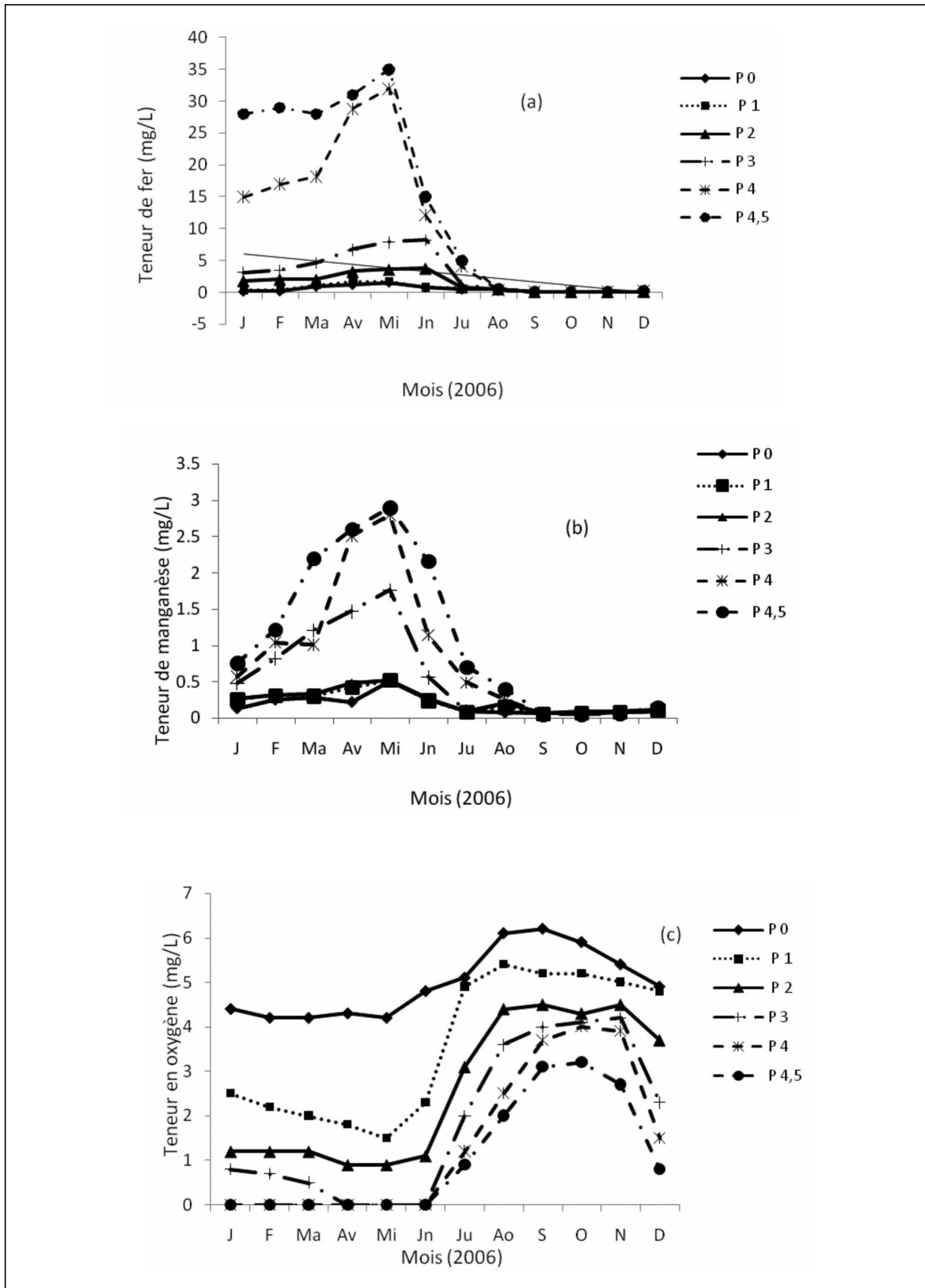


Figure 5 – Evolution des teneurs de l'eau (mg/L) en fer (a), manganèse (b), et oxygène dissous (c) en fonction de la profondeur pour l'année 2006.

Au cours de l'année 2005, les concentrations oscillent entre 0,01 mg/L et 38 mg/L pour le fer et entre 0,03 mg/L et 1,82 mg/L pour le manganèse. Si la stratification verticale est notée au cours des premier et sixième mois pour le fer, elle ne s'observe pour le manganèse qu'au cours du premier mois. La fin de la stratification de la colonne d'eau survient à mi-juin du fait des pluies qui ont commencé en mai entraînant le mélange des masses d'eau du fait du phénomène de remous et de dilution des différentes couches d'eau de la retenue.

En 2006 les teneurs du fer varient de 0,15 mg/L à 35 mg/L tandis que celles du manganèse se trouvent dans la gamme de 0,07 à 2,9 mg/L entre janvier et juin 2006, avec une stratification verticale des concentrations des deux métaux, comparable à celle notée en 2005. Pendant la saison des pluies les teneurs des métaux sont à leurs valeurs minimales très faibles quelle que soit la profondeur.

### 3.1. INTERPRÉTATION DES DONNÉES

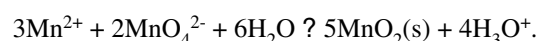
Globalement, pour la période d'étude (2003-2006), les données recueillies montrent une évolution en dents de scies des teneurs de fer et de manganèse le long de la colonne d'eau. Ces fluctuations sont dues aux phénomènes fluviaux qui caractérisent la forme primaire de toutes les ressources en eaux superficielles. Les études bibliographiques ont montré que les précipitations dans la zone d'étude ont une forte irrégularité interannuelle dans leur abondance comme dans leur répartition spatio-temporelle (Lebarbe, 1993). Alors, plus tôt, interviennent les premières pluies (abondantes et persistantes) dans le sous bassin versant (en avril ou en mai), très tôt procède-t-on également à l'ouverture des batardeaux (en juin ou juillet) ce qui favorise la circulation de l'eau. Le brassage des couches d'eau selon l'apport de flux venant de l'amont est immédiatement amorcé entraînant l'oxygénation de l'eau et par conséquent la chute des teneurs de l'eau en fer et en manganèse dissous par dilution et évacuation en aval des couches (la retenue étant très peu profonde). Par contre, un retard des précipitations oblige le maintien de la fermeture des batardeaux au-delà du mois de juillet à août, ce qui explique les fortes concentrations de fer et de manganèse au cours de l'année 2003 et le décalage observé à la même profondeur d'une année à l'autre.

Toutefois, cette fluctuation des valeurs enregistrées amène à minimiser l'importance de l'accumulation du fer et du manganèse au fond de la retenue. En effet, la profondeur maximum de la retenue étant de 8 mètres, une grande partie des dépôts sédimentés pendant la période d'étiage est lessivée et drainée en aval du barrage pendant la saison pluvieuse sous l'effet des forts courants d'eau. Mais, la forte colonisation de la retenue par des plantes aquatiques comme *Echinochloa stagnia*, *Scirpus cubensis*, *Polygonum salicifolium*, *Nymphaea lotus*, *Ceratophyllum demerson* et *Salvinia nymphellula* (Azokpota, 2002), contribue à l'enrichissement rapide du lac en détritiques végétaux issus de leurs

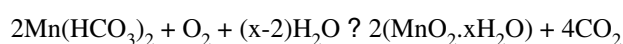
dégradations. La décomposition de ces déchets organiques au fond de la retenue provoque l'appauvrissement de l'eau en oxygène dissous tout en induisant la formation des acides humiques (LARAQUE et al., 1998). Ce processus rend plus anoxique l'hypolimnion et crée les conditions optimales favorables à la réduction des ions métalliques et par conséquent à leur relargage vers l'épilimnion.

La stratification chimique par rapport au fer et au manganèse au long de la colonne d'eau en saison sèche où les concentrations de ces éléments métalliques croissent de la surface vers le fond de la retenue, s'explique par le fait qu'en surface où la teneur de l'oxygène dissous est plus élevée, le fer et le manganèse se trouvent beaucoup plus sous leurs formes oxydées moins solubles, tandis qu'en profondeur (à P<sub>4,5</sub>) où l'oxygène est rare, les formes réduites plus solubles sont en forte concentration. En saison pluvieuse, le cours d'eau est en perpétuelle agitation ; pendant ce temps non seulement l'eau s'enrichit en oxygène dissous, mais on assiste également à l'uniformisation de sa concentration le long de la colonne d'eau responsable de l'oxydation du fer dissous qui précipite sous forme de Fe(OH)<sub>3</sub>(s) (MATEJKA et al., 1992). Ce qui explique les faibles teneurs du fer en période de pluie. Au vu des travaux effectués en 1992 par Matejka et al. en 1992 qui indiquent que la vitesse d'oxydation du fer II dépend de la température et du pouvoir tampon du milieu, les conditions physico-chimiques observées en période de crue dans la retenue de l'Okpara (température moyenne de 25°C, pH compris entre 5,8 et 6,6, conductivité électrique dans la gamme de 60-75 µS.cm<sup>-1</sup>) sont favorables à la réduction du taux de fer dissous dans l'eau. Aussi le niveau de l'alcalinité est-il suffisant pour favoriser la prolifération des bactéries autotrophes (*Sphaerotilus*, *Leptothrix*, *Crenothrix*, *Gallionella*, *Siderocapsa*, *Naumaniella Sidérocapsacea* et *Thibacillus ferrooxidans*) capables d'oxyder à la fois le fer et le manganèse.

Quant au manganèse, son oxydation directe par l'oxygène dissous est une réaction très lente (DESJARDINS, 1997). Cette oxydation est généralement réalisée dans l'épilimnion par des bactéries spécifiques (surtout les *Pseudomonas manganooxydans*, les Sidérobactéries du genre *Leptothrix echinata* et les Hyphomicrobiales du genre *Hyphomicrobium vulgare*) qui, dans des conditions favorables à leur développement (teneur en oxygène élevée, potentiel redox élevé) tirent leur énergie de la réaction suivante (HASLAY et LECLERC H., 1993) :



Cependant, l'oxygène dissous dans l'eau peut dans une moindre mesure oxyder le manganèse selon l'équation chimique :



Les dioxydes manganiques (MnO<sub>2</sub>·xH<sub>2</sub>O), obtenus se déposent sous forme de nodules à la surface des sédiments, contribuant ainsi à la réduction du taux de manganèse de

l'eau. Le manganèse, un métal amphotère, peut se trouver parfois complexé par les acides humiques rencontrés dans les eaux de surface (LEVESQUE, 1980) et normalement son élimination pourrait être facilitée par les procédés de floculation/coagulation.

Les forts taux de fer et de manganèse au niveau de l'hypolimnion pendant la période de transition saison pluvieuse-saison sèche peuvent s'expliquer par la remise en solution des nodules d'oxydes de manganèse et de fer déposés pendant la période des hautes eaux où l'eau est oxygénée. Alors, dès la fermeture des batardeaux, la surface d'échange eau-atmosphère devient quasiment immobile, la colonne d'eau s'appauvrit donc en oxygène dissous de la surface vers les profondeurs, les bactéries responsables de l'oxydation du fer et du manganèse utilisent en condition réductrice, pour leurs métabolismes, le fer et le manganèse qu'elles ont stockés dans leurs gaines et qui sont de ce fait solubilisés et relargués sous forme de fer et manganèse bivalents ( $\text{Fe}^{2+}$ ;  $\text{Mn}^{2+}$ ), ce phénomène pouvant être accentué par les valeurs élevées de l'alcalinité de l'eau et de sa teneur en silicates pendant cette période (LEVESQUE, 1980).

Aussi l'intense trafic des véhicules usagers à travers le pont construit sur la digue principale de la retenue peut-il contribuer aux taux relativement forts du manganèse dans l'environnement immédiat. car, selon une étude rapportée par « Santé Canada, 2001 », le trafic automobile, est susceptible de générer des teneurs relativement élevées de manganèse dans l'air, provenant de la combustion de carburant contenant du MMT (méthylcyclopentadiényl manganèse tricarbonyle), un additif de l'essence, et qui peut se retrouver dans le plan d'eau sous forme de retombées atmosphériques.

## 4. CONCLUSION

Le dosage du fer et du manganèse le long de la colonne d'eau de la retenue du barrage de l'Okpara, a permis d'évaluer la teneur de ces métaux responsables de l'altération de la qualité organoleptique de l'eau distribuée dans la ville de Parakou.

De cette étude il ressort que l'eau de la retenue de l'Okpara est stratifiée : la concentration du fer et du manganèse dépend du point de prélèvement de l'eau le long de la colonne d'eau et de la période de mesures. Pendant les périodes de basses eaux, le fond de cette ressource en eau est caractérisée par l'abondance des formes réduites du fer et du manganèse, alors qu'en saison de hautes eaux le fer et le manganèse se retrouvent sous formes oxydées et sont quasi uniformément réparties dans l'ensemble de la couche de l'eau. L'eau prélevée à la surface entre 0 et 2 mètres est moins riche en fer et manganèse à des teneurs maximales de 1,5 mg/L. et nous en avons déduit que le pompage de l'eau brute opéré à cette profondeur permettra de réduire sensiblement la charge minérale et de produire une eau potable de bonne qualité en saison sèche avec très peu de coagulant.

C'est ainsi qu'il a été suggéré à la SONEB à la suite des analyses de nos résultats des deux premières années (2003-2004), de procéder à l'enlèvement mécanique des macrophytes qui colonisent l'ensemble de la surface de la retenue et d'équiper le système de prise de l'eau brute de pompes susceptibles d'aspirer de l'eau dans la zone proche de la surface de l'eau moins chargée en métaux afin de diminuer et d'améliorer le traitement classique dans la station de Banikanni et de réduire le coût du traitement en période de saison sèche.

## 5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR (1995). *Manuel environnement à l'usage des industriels*, 1<sup>re</sup> Edition, 394 p.
- AFNOR, (1997). *Qualité de l'eau : méthode d'analyses I. Analyse organoleptique, mesure physico-chimiques, paramètres globaux, composés organiques*, 2<sup>e</sup> Ed. AFNOR Tome 2, 10-11 p.
- AWOUEKOUN R. et N'TCHA T. (2005), *Identification hydrodynamique et hydrochimique des sous bassins versants superficiels et souterrains de la retenue de l'Okpara à Kika exploitée pour l'Alimentation en Eau Potable de la ville de Parakou*, Mémoire de maîtrise en géologie au département de Géologie à l'Université d'Abomey-Calavi.
- AZOKPOTA V. (2004). *Etude diagnostique des facteurs de prolifération des plantes aquatiques dans la retenue d'eau de l'Okpara : contribution à une gestion intégrée et durable des ressources en eau de surface en république du Bénin*, Mémoire de DESS MEQUE au Département de Chimie de l'Université d'Abomey-Calavi.
- BECHAUX J., (1989). *Mémento technique de l'eau*.
- BUFFLE J. PH. et MALLEVIALLE J. (1974) "Le rôle des matières humiques envisagées comme agent d'accumulation et véhicule des substances toxiques dans les eaux", *T.S.M. L'Eau*, Juin 1974, pp. 331-339
- CENATEL et DGH, (2003). Banques de données intégrées.
- CHAMAYOU H. LEGROS J-P (1989). *Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol*, Paris, Presses universitaires de France
- CLASEN J. (1969) "Teneur en manganèse d'un lac : relations avec les microorganismes", *Stadtehygiene*, Juillet 1969, p. 171-174
- DESJARDINS Raymond (1997). *Le traitement des eaux*, 2<sup>e</sup> Edition, Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 304 p.
- DELFINO J.J.(1971) "Variation of manganese, dissolved oxygen and related chemical parameters in the bottom waters of lake Mandota, Wisconsin", *Water research*, Décembre 1971, pp. 1207-1217
- EHRlich HL (1990) *Geomicrobiology*, (2<sup>nd</sup> Ed). Nex York, Marcel Dekker, Inc, 646 p.
- GAUJOUS D. (1995). *La pollution des milieux aquatiques aide-mémoire*. Lavoisier.
- GREENE L.A. (1971) "The problems of iron and manganese in water supplies", *British waterworks Ass. Rapport au congrès de juin 1971*, 30 pages.

- GUIGNARD H.(1957) "Observations sur les variations de teneurs en manganèse dans les retenus", *L'eau*, Juillet 1957, pp. 143-147.
- HASLAY C. et LECLERC H. (1993). *Microbiologie des eaux d'alimentation*. Editions TEC et DOC, 495 p.
- HARLAND CE, GRIMSHAW RW (1994). *Iron exchange : theory and practice*, Cambridge : Royal Society of Chemistry.
- HEM J.D. et CROPPER W.H. (1959) "Survey of ferrous-ferric chemical equilibria and redox potentials", *Geological survey water supply paper 1459*. A-1959, 30 pages.
- HEM J.D. (1960) "Chemical equilibria and rates of manganese oxidation", *Geological survey water supply paper 1667*. A-1963 - 64 pages.
- INGOLS R.S. et WILROY R.D. (1962) "Observations on manganese in Georgia waters", *J.A.W.W.A.*, Février 1962, Vol. 54, n°2, pp. 203-207.
- INGOLS R.S. et WILROY R.D. (1963) "Mechanism of manganese solution in lake waters", *J.A.W.W.A.*, Mars 1963, vol. 55, n°3, pp. 282-290.
- JENNE E.A. (1968) "Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn concentrations in soils and water: the significant role of hydrous Mn and Fe oxides", *Trace inorganics in water*, 1968 - pp. 337-381.
- KIM Y.S. et MARTIN D.F. (1974) "Interrelationship of peace river parameters as a basis of the iron index: a predictive guide to the florida red tide", *Water research*, 1974, vol. 8, pp. 607-616.
- KIRCHNER W. B. et GRABOWSKI S. (1972) "Manganese in lacustrine ecosystem: A review", *Water resources bulletin*, Décembre 1972, pp. 1259-1264.
- LACAZE J-C, (1996). *L'eutrophisation des eaux marines et continentales: causes, manifestations, conséquences et moyens de lutte*. Editeur Ellipses/ Edition marketing S.A., 1996.
- LARAQUE A., MIETTON M., OLIVRY J. C., et PANDI A. (1998) "Influence des couvertures lithologiques et végétales sur les régimes et la qualité des eaux des affluents congolais du fleuve Congo", *Revue des Sciences de l'Eau*, 11(1999) 209-224.
- LEBARBE L. (1993) *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*, Ed : ORSTOM Collection : Monographie n°1 Paris. 540 p.
- LECLERC E. et BEAUJEAN P. (1955) "Eaux naturelles. Recherche relative aux complexants du fer. Action complexante des substances organiques des Hautes-Fagnes", *Bulletin mensuel du C.B.E.D.E.*, juin 1955, n°56, pp. 170-176.
- LECLERC H. et MOSSEL D.A.A., (1989). *MICROBIOLOGIE : le tube digestif, l'eau et les aliments*, DOIN Editeurs, 8 place de l'Odéon 75006 Paris, 513 p.
- LELAND H.V. et COPENHAVER E.D. (1974) "Heavy metal and other trace elements", *J.W.P.C.F.*, 6 juin 1974, pp. 1452-1476.
- LEMOALLE J. (1973) "Bilan des apports en fer au lac Tchad - 1970-1973", *Cahiers de l'ORSTOM, série hydrobiologie*, vol. 8 - n°1.
- LEVESQUE L., (1980) *Les micropolluants minéraux dans les eaux superficielles continentales*, Rapport N°4, Publication de l'Association Française pour l'Etude des Eaux (AFEE) 21-23 Rue de Madrid- Paris 8<sup>e</sup>.
- MASSECHELEIN W. J. (1996) *Processus unitaires du traitement de l'eau potable*, Editions CEBEDOC, 693 p.
- MATEJKA G. (1992) "Les échanges de phosphore à l'interface eau-sédiment", *Tribune de l'eau* n°556/2, p. 25.
- MacCABE L.J. (1975) "Problem of trace metals in water supplies. A overview", *Sixteenth water quality conference*, 139 p.
- MEHU D. (1972) *La pollution des eaux superficielles*, Mémoire de D.E.A., Lab. d'Ecologie d'Orléans, 1972, 48 p.
- MICHARD G. (2002). *Chimie des eaux naturelles*, Paris, publisud.
- MORGAN J.J. (1967) "Chemical equilibria and kinetic properties of manganese in natural waters", *Principles and applications of water chemistry*, 1967, pp. 561-624. Extrait de F 1497.
- MORGAN J.J. et STUMM W. (1965) "Analytical chemistry of aqueous manganese", *J.A.W.W.A.*, Janvier 1965, vol. 57 - n°1, pp. 107-119.
- NEWELL I.L. (1965) "Manganese in drinking water supplies", *Journal of the new England water works association*, Vol. 79 n°3, Septembre 1965, pp. 277-286.
- OBORN E.T. et HEM J.D. (1961) "Microbiologic factors in the solution and transport of iron", *Geological survey water-supply paper 1459-H*, 1961, 44 pages. Extrait de F 908.
- O'CONNOR, J.T. (1971). *Iron and Manganese. Water Quality and Treatment*, Am. Water Works Assoc. Inc., Denver (Colorado), 1971.
- OLIVIER Atteia (2005) *Chimie et pollutions des eaux souterraines*, Editions TEC et DOC, 398 p.
- PERHAC R.M. (1972) "Distribution of Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn in dissolved and particulate solids from two streams in Tennessee", *Journal of hydrology*, 1972, pp. 177-186.
- PLUMB Jr R.H. et LEE G.F. (1973) "A note on the iron-organic relationship in natural water", *Water research*, Avril 1973, pp. 581-585.
- RODIER J. (1978) *Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, chimie, physico-chimie, bactériologie*, 6<sup>e</sup> édition : Paris Dunod-XXIII, 1135 p.
- Santé, Canada, (1993). *Revue scientifique*.
- SBEE, (1990). *Rapport de l'étude hydrogéologique et hydrologique de la zone de Parakou*.
- SILVERMAN M. P. et LUNDGREN D. G. (1959) "Studies of the chemoautotrophic iron bacterium ferrobacillus ferrooxidans", *Journal of bacteriology*, 1959, pp. 642-647.
- SPOSITO G (2000) *Iron exchange phenomena*. CRC Press. Boca raton, FL, United States.
- STUMM X, MORGAN J (1996). *Aquatic chemistry ; chemical equilibria and rates in natural waters*, New York, Chichester, Brisbane : J. Wiley and sons.
- WALSH F. et MITCHELL R. (1972) "A pH dependant succession of iron bacteria", *Environmental science and technology*, septembre 1972, pp. 809-812.
- WASSER O. (1938) "Le fer dans l'eau et les bactéries ferrugineuses. Caractères biologiques des bactéries ferrugineuses. Les bactéries ferrugineuses dans les adductions d'eau.

Moyens propres à empêcher le développement de ces bactéries dans l'eau potables, *L'Eau*, août 1938, pp. 90-92 ; *L'Eau*, septembre 1938, pp. 103-105 ; *L'Eau*, octobre 1938, pp. 116-117.

WOLFE R.S. (1960) "Microbial concentration of iron and manganese in water with low concentrations of these elements", *J.A.W.W.A.*, vol. 52, n°10, octobre 1960, pp. 1335-1337.

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent au Dr Guy FRANSOLET de l'Université de Liège pour ses précieuses contributions à la réalisation de la présente étude, à madame Irma NOUGBODE, messieurs Damase ATCHEKPE, Clément BALOGOUN tous Agents du laboratoire central de la SONEB, pour leurs collaborations et investissements qui nous ont permis de mener ce travail.