



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté des Sciences Dhar El Mahraz- Fès
Centre d'Etudes Doctorales
"Sciences et Technologies"

Formation Doctorale: Ressources Naturelles Environnement et
Développement Durable, RNE2D

Discipline : Chimie

Spécialité : Chimie-Physique appliquée

Laboratoire : Ingénierie d'Electrochimie, de Modélisation et
d'environnement, LIEME

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

El Allaoui Nouha

Evaluation de la charge polluante et traitement des effluents de la ville de
Fès en amont de la STEP par des procédés intégrés : Optimisation et
Modélisation des résultats

Soutenue le 10/02/2018 devant le jury composé de :

Pr. Mustapha TALEB	FSDM- Fès	Président
Pr. Hassan El Halouani	Faculté des sciences- Oujda	Rapporteur
Pr. Taleb Abdeslam	FST- Mohammedia	Rapporteur
Pr. Merzouki Mohammed	FSDM- Fès	Rapporteur
Pr. Bahhou Jamila	FSDM- Fès	Examinatrice
Pr. Abdellaoui Abdelfattah	FSDM- Fès	Examineur
Pr. Mounia El Haji	ENSEM- Casablanca	Co-directrice de thèse
Pr. Zakia Rais	FSDM- Fès	Directrice de thèse

Année universitaire : 2017-2018

RÉSUMÉ

Les ressources naturelles en eau au Maroc sont parmi les rares au monde. En effet, le potentiel des ressources en eau naturelles, est évalué à 22 milliards de m³ par an, soit l'équivalent de 750 m³/habitant/an. Plus de la moitié de ces ressources sont concentrées dans les bassins du nord et le bassin de Sebou qui couvre presque 7% du territoire national. Ce dernier reçoit chaque année des quantités énormes d'effluents pollués émanant des villes voisines. La ville de Fès génère à elle seule 40 % de la pollution de ce bassin, à cause des effluents de différentes activités artisanales rejetés sans aucun traitement préalable.

La présente étude concerne tout d'abord, l'identification des effluents les plus pollués de la ville de Fès. Sur la base de cette identification, une évaluation de la charge polluante, de deux effluents les plus chargés, a été réalisée. Ensuite, des méthodes de traitements physico-chimiques ont été proposées ainsi qu'une modélisation des résultats obtenus. Enfin, une valorisation des déchets de traitement dans la filière de compostage a été envisagée.

Les résultats du diagnostic réalisé sur tous les effluents des différents regards de la ville de Fès montrent que les effluents des sites Chenal des tanneurs Ain Nokbi (P1) et chenal de l'ancienne médina (P2) sont les plus pollués.

Le suivi spatio-temporel de la charge polluante de ces deux effluents par mesure des paramètres physico-chimiques, pendant une année, révèle qu'ils se caractérisent par une forte pollution chronique d'origine organique, phosphorique et métallique. Des tests statistiques (Carte thématique, ANOVA et ACP) ont été réalisés pour interpréter les résultats expérimentaux.

Le traitement physico-chimique a été réalisé par trois méthodes : l'adsorption sur le charbon actif préparé à partir de la sciure du bois d'Eucalyptus, la coagulation-floculation par le sulfate d'aluminium et l'électrocoagulation en utilisant six électrodes métalliques en aluminium. La performance de chaque type de traitement a été évaluée en calculant le taux d'abattement des trois principaux paramètres à savoir : La demande chimique en oxygène (DCO), le chrome (Cr) et le phosphore (P). Les paramètres utilisés, dans chaque méthode de traitement, ont été optimisés et modélisés par surface de réponse (RSM). Les résultats obtenus ont permis de montrer que les trois méthodes de traitement des effluents étudiés présentent une efficacité moyenne supérieure à 80% dans les conditions optimales. Cependant, l'adaptation du procédé de la coagulation-floculation avec les conditions de traitement (taux d'abattement, débit, prix) a suscité notre intérêt pour le recommander aux autorités locales comme technique puissante et adéquate pour le prétraitement des eaux usées de la ville de Fès en amont de la STEP.

La valorisation des boues produites, durant les traitements dans la filière de compostage, mélangés avec d'autres déchets, dénote une efficacité et une stabilité de l'amendement organique produit avec un rapport C/N aux alentours de 10.

Mots-clés : Traitement des effluents, Adsorption, Coagulation-floculation, Electrocoagulation, Analyses statistiques, Compostage

CHAPITRE III: Evaluation de la Qualité des effluents de la ville de Fès en amont de la STEP

I. Introduction

Le traitement efficace d'un effluent nécessite une bonne connaissance de débit, sa qualité (composition chimique) et des variations temporelles de sa composition. Bien évidemment, les considérations technologiques (taille des infrastructures, conception modulaire de l'installation et évolution possible de la technique vis-à-vis de la réglementation) et surtout économiques (frais d'investissement, coûts de la méthode, frais d'entretien et de maintenance) sont des facteurs importants pour le choix du procédé à mettre en œuvre. Le présent chapitre, traite l'évaluation de la qualité des effluents de la ville de Fès en amont de la STEP.

Pour ce faire, nous avons, tout d'abord, procédé à une caractérisation des effluents des grands regards de la ville afin de préciser les points les plus pollués.

Le deuxième axe présente les résultats du suivi spatiotemporel des paramètres de pollution des effluents de deux sites P1 et P2 identifiés très pollués et les résultats du suivi statistique de ces paramètres.

II. Caractérisation des effluents de la ville de Fès

Les eaux usées analysées sont celles de provenance des grands collecteurs des deux communes de Fès et Mechouar Fès Jdid de la ville de Fès, ils sont en nombre de 10 qui sont : Le bassin Massira, le bassin Wifaq, le quartier Bab El Khoukha , le bassin de Sidi Brahim, l'amont de Boufekrane, le quartier de Dokkarat, l'Oued Zhoun, le chenal des tanneurs de Ain Nokbi, le chenal de la ville nouvelle et l'ancienne Medina

II.1. Caractérisation physico-chimique des effluents de dix sites de la ville de Fès

Au niveau du laboratoire 8 paramètres physico-chimiques ont été analysés, à savoir : Température; pH ; Conductivité ; MES ; DCO ; DBO₅ ; NTK et Sulfate. Les résultats de la caractérisation des eaux usées des dix stations de la ville de Fès sont répertoriés sous forme d'histogramme ci-dessous (Figure 18 et 19).

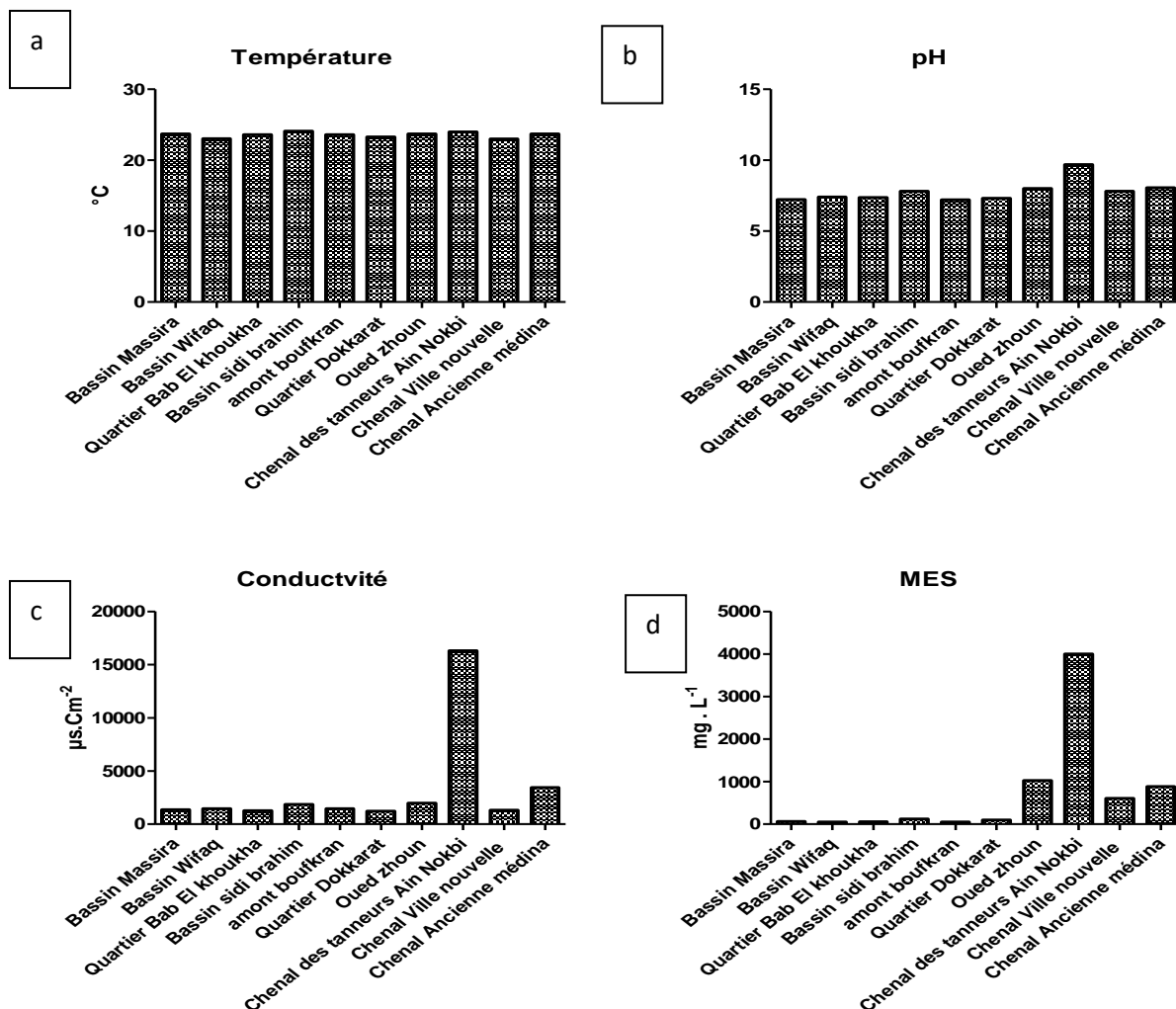


Figure 18: Paramètres physiques de la caractérisation des eaux usées dans les dix sites de la ville de Fès. (a) Température (°C); (b) pH; (c) Conductivité (µS.m⁻¹); (d) MES (mg.L⁻¹).

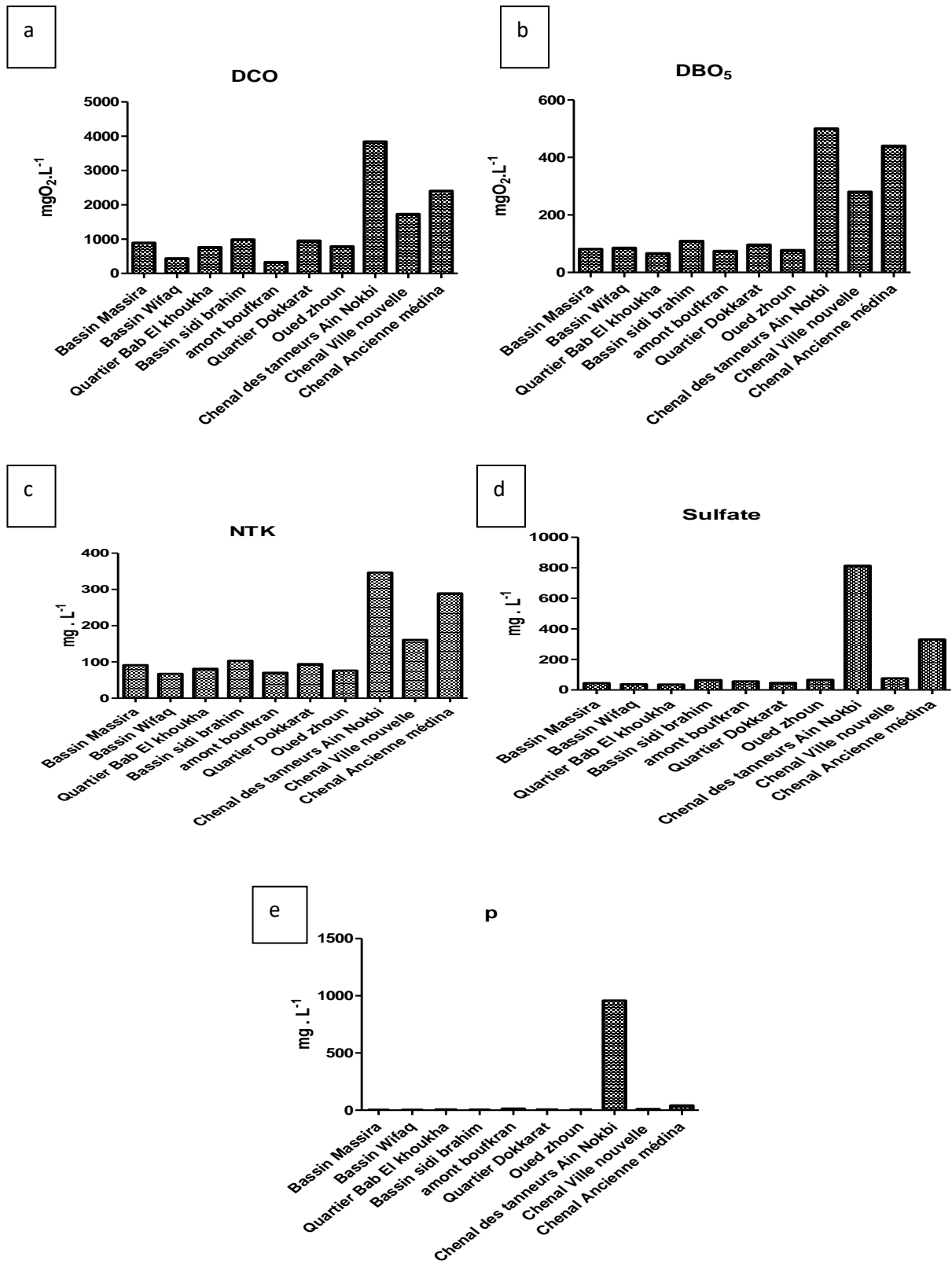


Figure 19: Paramètres physico-chimiques de la caractérisation des eaux usées dans les dix sites de la ville de Fès. (a) DCO ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); (b) DBO₅ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); (c) NTK ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); (d) sulfate ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); (e) Phosphore ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

Le dépouillement des résultats obtenus (Figures 18 et 19) montre que la moyenne de température des eaux usées des 10 sites est entre 23.05 et 24.1°C, elle ne dépasse pas les normes marocaines de rejet direct 36-15 qui est de 30°C (Bulletin Officiel , 2016). Les valeurs moyennes de pH trouvées sont presque neutres dans la totalité des sites sauf pour les deux sites : Le Chenal des tanneurs Ain Nokbi (9,68) et le Chenal de l'ancienne Médina (8.05). La conductivité et les matières en suspension (MES) sont très élevées au niveau du site des tanneurs Ain Nokbi, qui sont respectivement de 16300 $\mu\text{s.Cm}^{-2}$ et 4023 mg.L^{-1} . La demande chimique en oxygène dépasse la norme de rejet autorisée (120 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$) dans tous les sites de la ville, elle atteint 2400 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$ dans le site de l'ancienne Médina et 3840 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$ dans les rejets des tanneries d'Ain Nokbi. La matière organique biodégradable représentée par la DBO_5 atteint des valeurs qui peuvent aller jusqu'à 500 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$ (les rejets des tanneries). Tandis que la valeur fixée par le bulletin officiel des rejets est de 40 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$ (Bulletin Officiel , 2016). La figure 19c représente les valeurs de l'azote Kjeldhal dans les dix sites de la ville de Fès. Les concentrations sont entre 67 mg.L^{-1} au Bassin du Wifaq et 346.57 mg.L^{-1} au niveau du Chenal des tanneurs, dépassant largement la valeur des normes de rejets qui est de 40 mg.L^{-1} . Les sulfates ne dépassent pas les normes de rejet 36-15 (500 mg.L^{-1}) dans toutes les eaux usées étudiées, excepté les rejets de tannerie d'Ain Nokbi dont la concentration est de 814 mg.L^{-1} . Tandis que la concentration en phosphore est aiguë dans la plupart des sites de la ville. Les valeurs les plus élevées sont celles du site des rejets de tanneurs Ain Nokbi et du Chenal de l'ancienne Médina avec des valeurs respectives de 957 et 23.128 mg.L^{-1} .

II.2. Caractérisation métallique des effluents de dix sites de la ville de Fès

Quatorze éléments métalliques ont été analysés par ICP. Le tableau 7 représente les différents éléments métalliques (EM) analysés durant cette caractérisation, susceptibles d'être présents dans les effluents, ayant fait l'objet d'un prélèvement, suite aux différentes activités artisanales de la zone de l'étude.

Tableau 7: Eléments métalliques caractérisant les effluents étudiés

Eléments métalliques	Ag mg.L ⁻¹	As mg.L ⁻¹	Ba mg.L ⁻¹	Cd mg.L ⁻¹	Co mg.L ⁻¹	Cr mg.L ⁻¹	Cu mg.L ⁻¹
Bassin Massira	< 0.01	≤0,01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0,36	< 0.01
Bassin Wifaq	< 0.01	≤0,01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0,4	< 0.01
Quartier Bab El khoukha	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0,202	< 0.01
Bassin sidi brahim	0,047	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0,896	< 0.01
Amont boufkran	< 0.01	< 0.01	0,014	< 0.01	< 0.01	0,378	< 0.01
Quartier Dokkarat	< 0.01	< 0.01	0,033	< 0.01	< 0.01	0,021	< 0.01
Oued zhoun	< 0.01	< 0.01	0,012	< 0.01	< 0.01	0,127	< 0.01
Chenal des tanneurs Ain Nokbi	0,03	< 0.01	0,224	< 0.01	< 0.01	70,268	4,680
Chenal Ville nouvelle (Amont STEP)	< 0.01	< 0.01	0,010	< 0.01	< 0.01	2,947	< 0.01
Ancienne Médina	0,021	< 0.01	0,088	< 0.01	< 0.01	15,922	3.01
Norme 36-15(Bulletin Officiel , 2016)	0,05	0,05	0,5	0,2	0,1	0,5	3

Eléments métalliques	Fe mg.L ⁻¹	Mn mg.L ⁻¹	Ni mg.L ⁻¹	Pb mg.L ⁻¹	Sb mg.L ⁻¹	Se mg.L ⁻¹	Zn mg.L ⁻¹
Bassin Massira	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Bassin Wifaq	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Quartier Bab El khoukha	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Bassin sidi brahim	< 0.01	0,017	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0,025
amont boufkran	0,052	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0,101
Quartier Dokkarat	< 0.01	0,010	< 0.01	0,024	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Oued zhoun	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Chenal des tanneurs Ain Nokbi	1,040	0,490	0,980	0,510	< 0.01	< 0.01	0,251
Chenal Ville nouvelle	0,100	0,018	0,002	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0,07
Ancienne Médina	0,640	0,320	0,025	0,017	< 0.01	< 0.01	0,119
Norme36-15 (Bulletin Officiel , 2016)	5	1	5	1	0,1	0,05	5

Le dépouillement des résultats révèle une concentration élevée en cuivre de 4.68 et 3.01 mg.L⁻¹ dans les rejets des tanneries d' Ain Nokbi et de l'ancienne Médina respectivement. La toxicité en chrome atteint 4 sites de la ville : Le Bassin de Sidi Brahim avec une concentration de 0.896 mg.L⁻¹; le Chenal de la ville nouvelle avec 2,947 mg.L⁻¹ ; le Chenal des tanneurs Ain Nokbi avec une valeur alarmante de 70.268 mg.L⁻¹, et le site de l'ancienne Médina avec une valeur de 15.922 mg.L⁻¹.

Les résultats ainsi obtenus enregistrent que les effluents les plus pollués des sites étudiés sont ceux qui émanent des tanneries d'Aiin Nokbi et du chenal de Fès médina à cause de forte charge en matière organique non biodégradable (DCO), en phosphore et en chrome.

La suite de l'étude sera effectuée sur les effluents des deux sites suscités

III. Suivi spatio-temporel de la charge polluante des effluents des sites les plus pollués P1 et P2 de la ville de Fès

Les deux sites choisis pour le suivi spatio-temporel sont le site des tanneurs de l'Ain Nokbi nommé (P1) et le site du Chenal de l'Ancienne Médina (P2). Le suivi a été effectué durant toute l'année 2015/2016 en se concentrant sur la période d'Aid al Adha. Les paramètres suivis durant l'étude sont : Le débit, la température, le pH, la conductivité électrique, les matières en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO) , la demande biologique en oxygène (DBO₅), les Nitrates(NO₃⁻), les Nitrites, Azote kjeldahl (NTK), les Orthophosphates (PO₄³⁻), les Sulfates (SO₄²⁻), Les Cyanures, l'Ion cuivrique (Cu^{II}), le Chrome hexavalent (Cr^{VI}) et le Chrome trois (Cr^{III}).

III.1. Résultats des analyses physico-chimiques

III.1.1. Le Débit

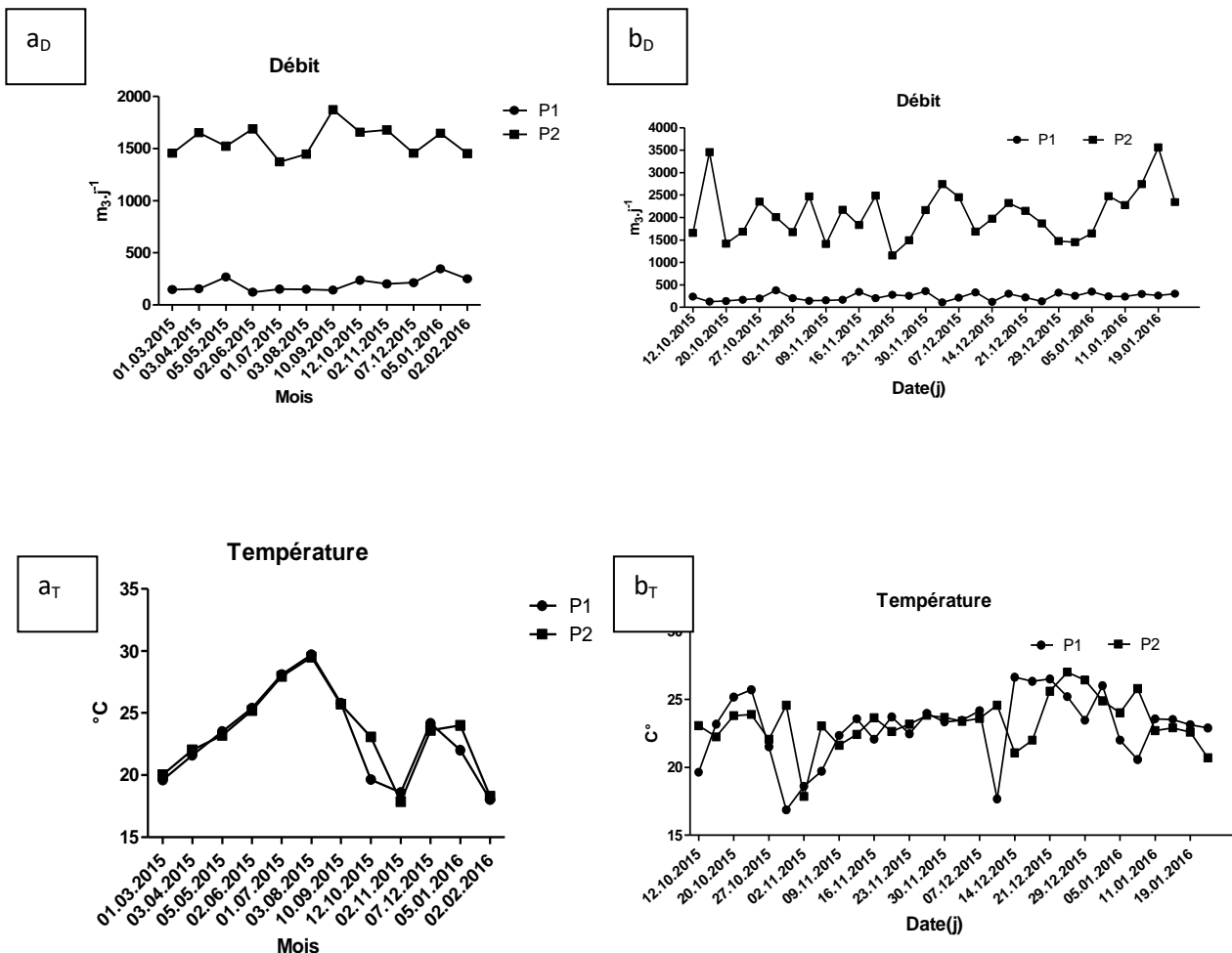
Les deux figures 20 a_D et b_D représentent respectivement, le paramètre débit durant toute l'année 2015/2016 et un zoom sur la période de l'Aid al Adha. L'analyse des résultats révèle que la charge polluante des deux effluents a la même tendance d'évolution à cause du rejet des eaux usées des entreprises artisanales (composé des effluents de tannerie, poteries, dinanderies, teinture de textile,...) dans le réseau d'assainissement collectif. Les résultats obtenus montrent que le débit du point P2 est presque 8 fois plus important que celui du point P1 car il collecte les effluents industriels et domestiques de tous les quartiers. La valeur moyenne du débit dans les deux sites P1 et P2 pendant l'année 2015/2016 (Figure 20 a_D) est de 199.2 et 1576 m³/j respectivement, et pourrait atteindre jusqu'à 3560 m³/j selon les activités artisanales quotidiennes (Figure 20 b_D).

III.1.2. La Température

La température des effluents durant l'année 2015/2016 dans le site P1 est comprise entre 18,02°C et 29,7°C comme extrêmes minimum et maximum et 23,01°C en moyenne (Figure 20 a_T et b_T). Pour le site P2, les valeurs minimales et maximales sont respectivement de 17,85 et 27 ° C avec une moyenne de 29,5°C. Ces variations de température suivent celles du climat de la région. Généralement, les températures enregistrées sur les deux sites sont inférieures à 30°C, soit la valeur limite de décharge directe selon les normes marocaines 36-15 (Bulletin Officiel , 2016).

III.1.3. Le pH

Les valeurs moyennes du pH trouvées dans deux endroits P1 et P2 sont respectivement de 8,45 et 7,54. Parfois ces valeurs dépassent largement la norme marocaine prescrite dans la norme 36-15 qui est comprise entre 5,5 et 8,5 ; et peuvent atteindre jusqu'à 12,17 pour P1 durant la période de l'Aid al Adha (Figure 20 a_{pH} et b_{pH}). Les deux effluents sont d'une moyenne à une forte basicité à cause des sulfures, des cyanures et de la chaux utilisés dans certaines unités opératoires des tanneries, des dinanderies, de peinture, principales activités artisanales trouvés dans la zone d'Ain Nokbi. Sachant que ces unités opératoires rejettent leurs effluents sans aucun traitement au préalable. Cette variation influence la plupart des réactions chimiques et contrôle la toxicité des métaux lourds dans les milieux aquatiques (Lokhande et al., 2012).



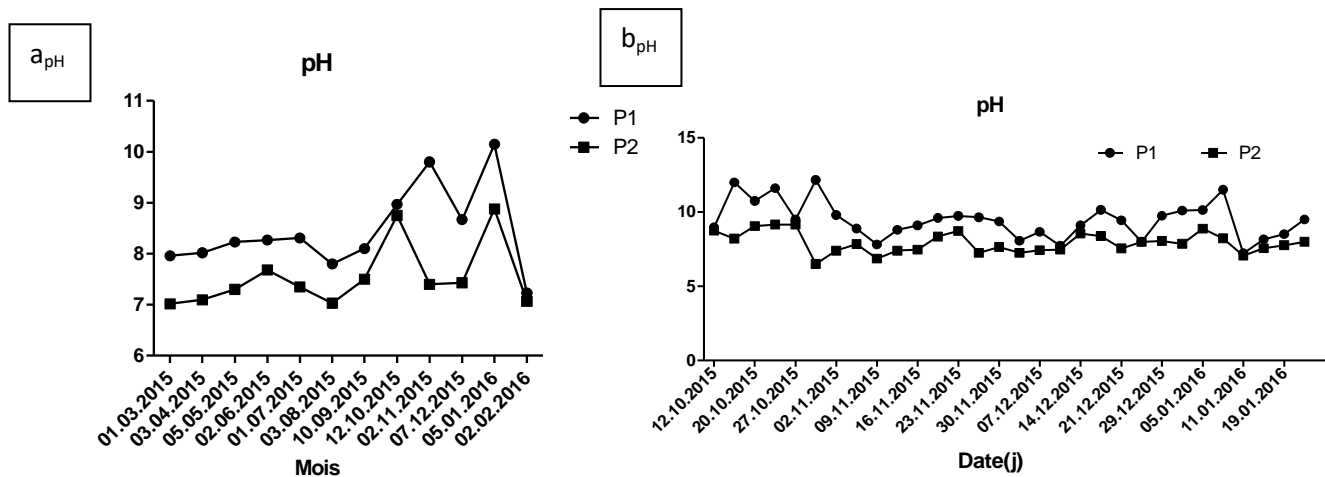


Figure 20: Suivi spatio-temporel de la qualité physico-chimiques des effluents des deux sites P1 et P2. (a) année 2015/2016 ; (b) octobre 2015 à janvier 2016. (aD ; bD) Débit (m³.j⁻¹) ; (aT ; bT) Température (°C) ; (apH ; bpH) pH.

III.1.4. La Conductivité électrique

La charge minérale des effluents du site P2 est proche de la norme durant toute l'année 2015/2016, sauf pour les deux mois d'Octobre et de Novembre où la conductivité atteint des valeurs supérieures à 3mS.cm⁻¹. La conductivité des effluents du site P1 surcroît celle du site P2 de 2 à 5 fois et fluctue entre 10 mS.cm⁻¹ et 27 mS.cm⁻¹ dépassant largement la norme marocaine des eaux de surface (2700µs. cm⁻¹) (Bulletin Officiel , 2016) (Figure 21 a_{CE} et b_{CE}), indiquant ainsi une minéralisation excessive de ces effluents attribuée aux sels utilisées lors du tannage.

III.1.5. Les Matières en suspension

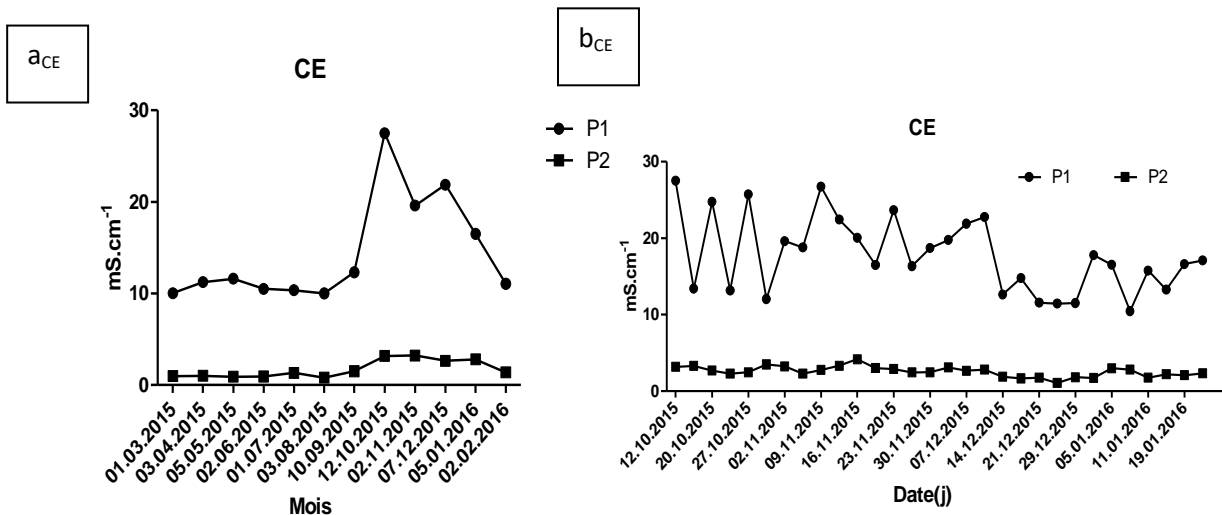
La moyenne des matières en suspension durant l'année 2015/2016 (Figure 21 a_{MES}) dans les deux sites P1 et P2 est de 2264 et 736.7 mg.L⁻¹ respectivement. Durant la période de l'Aid al Adha, ces valeurs peuvent atteindre 9080 mg.L⁻¹ dans P1 et 1880 mg.L⁻¹ dans P2 (Figure 21 b_{MES}). Tandis que la norme des rejets marocaine 36-15 est de 30 mg.L⁻¹. La présence de ces MES dans les rejets peut compromettre de manière sensible le fonctionnement du réseau d'égouts : causer les dépôts de boues et le colmatage des fonds aquatiques récepteurs (Ben Ali Rim, 2015).

III.1.6. La Demande d'oxygène chimique et biologique

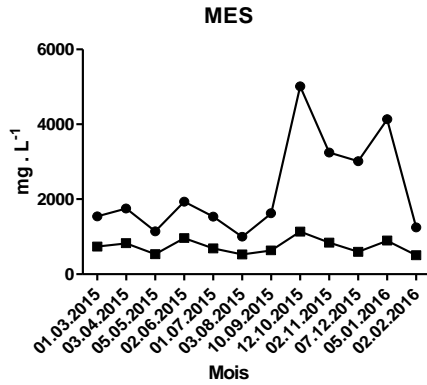
Durant l'année 2015/2016 (Figure 21 a_{DCO} et b_{DCO}), nous avons remarqué des fluctuations importantes au niveau de la DCO. Elle varie entre 1126 mg O₂.L⁻¹ (P1) ; 560 mg O₂.L⁻¹ (P2) et 4960 mg O₂.L⁻¹ (P1) ; 2048 mg O₂.L⁻¹ (P2). La figure 21 a_{DCO} montre que les valeurs de la

DCO s'élèvent au mois d'Octobre (début des activités artisanales après la fête de l'Aid Al Adha qui dépassent les $5200 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ pour le site P1 et $1472 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ pour le site P2. Ces valeurs diminuent au mois de Novembre et ré-augmentent en Décembre et à mi-janvier. Cette variation dépend pratiquement des activités artisanales (tanneries, brasseries, poteries, peintures ...) de la zone d'étude et explique la présence des matières organiques oxydables et non biodégradables. Dans l'ensemble, ces valeurs sont très élevées par rapport aux normes de rejet qui sont de $120 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ (Bulletin Officiel , 2016).

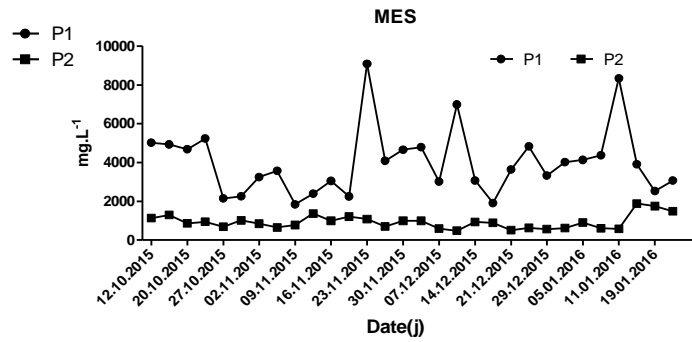
La Figure 22 a_{DBO} et b_{DBO} stipule que l'évolution temporelle de la demande biologique d'oxygène DBO_5 atteint son maximum dans la période de l'Aid Al Adha. En ce concentrant sur cette période (Figure 22 b_{DBO}), nous remarquons des variations importantes, en particulier, pour le site P1 avec $162 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ comme valeur minimale et $3000 \text{ m mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ comme valeur maximale. Les valeurs du site P2 oscillent entre 150 et $1550 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$. Ces valeurs restent largement supérieures à la norme de rejet qui est de $40 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ (Bulletin Officiel , 2016). En général, nous remarquons que la matière organique biodégradable dans les effluents du site P1 est plus élevée que le site P2 à l'exception de quelques jours des mois d'Octobre, de Novembre et de Décembre. Cela est probablement dû au manque d'activités chez les tanneurs, ou que la plupart des tanneries n'ont pas procédé à l'étape d'épilage et de planage des peaux.



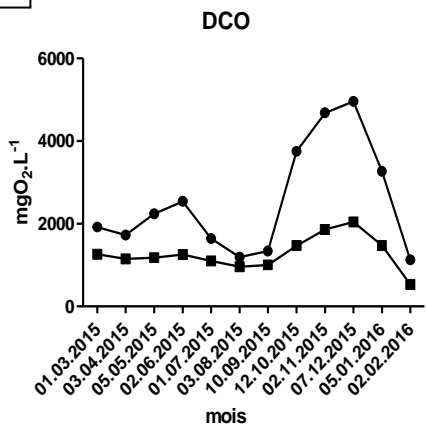
a_{MES}



b_{MES}



a_{DCO}



b_{DCO}

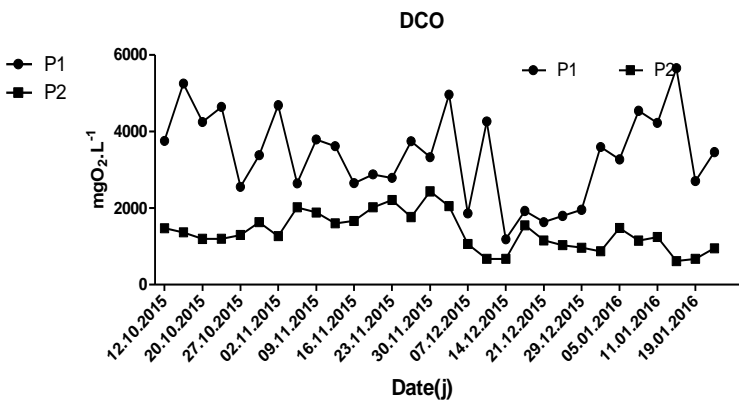


Figure 21 : Spatio-temporel de la qualité physico- chimiques des effluents des deux sites P1 et P2. (a) année 2015/2016 ; (b) octobre 2015 à janvier 2016. . (a_{CE} ; b_{CE}) Conductivité (mS.m⁻¹) ; (a_{MES} ; b_{MES}) MES (mg.L⁻¹) ; (a_{DCO} ; b_{DCO}) DCO (mg.O₂.L⁻¹).

Le rapport (DCO/DBO₅) tel qu'illustré à la (Figure 22 a_{DCO/DBO5}) évolue notablement avec le temps durant l'année 2015/2016 ; il passe de 1,78 à plus de 5.24 dans le site P1 et de 1,22 à 3.71 dans P2. En ce concentrant sur la période de l'Aid al Adha (Figure 22 b_{DCO/DBO5}), nous remarquons que le ratio de biodégradabilité atteint un sommet au début d'octobre et au début et fin de décembre. Tandis que les effluents du site P2 peuvent atteindre des valeurs minimales allant jusqu'à 0.3 pendant cette période. La valeur moyenne de biodégradabilité durant l'année 2015/2016 des deux sites est respectivement de 3.06 et 2.4 dans P1 et P2. Cette variation influence la nature de la biodégradation des matières organiques des eaux usées. Ces derniers passent d'effluents biodégradables à non biodégradable d'un jour à l'autre.

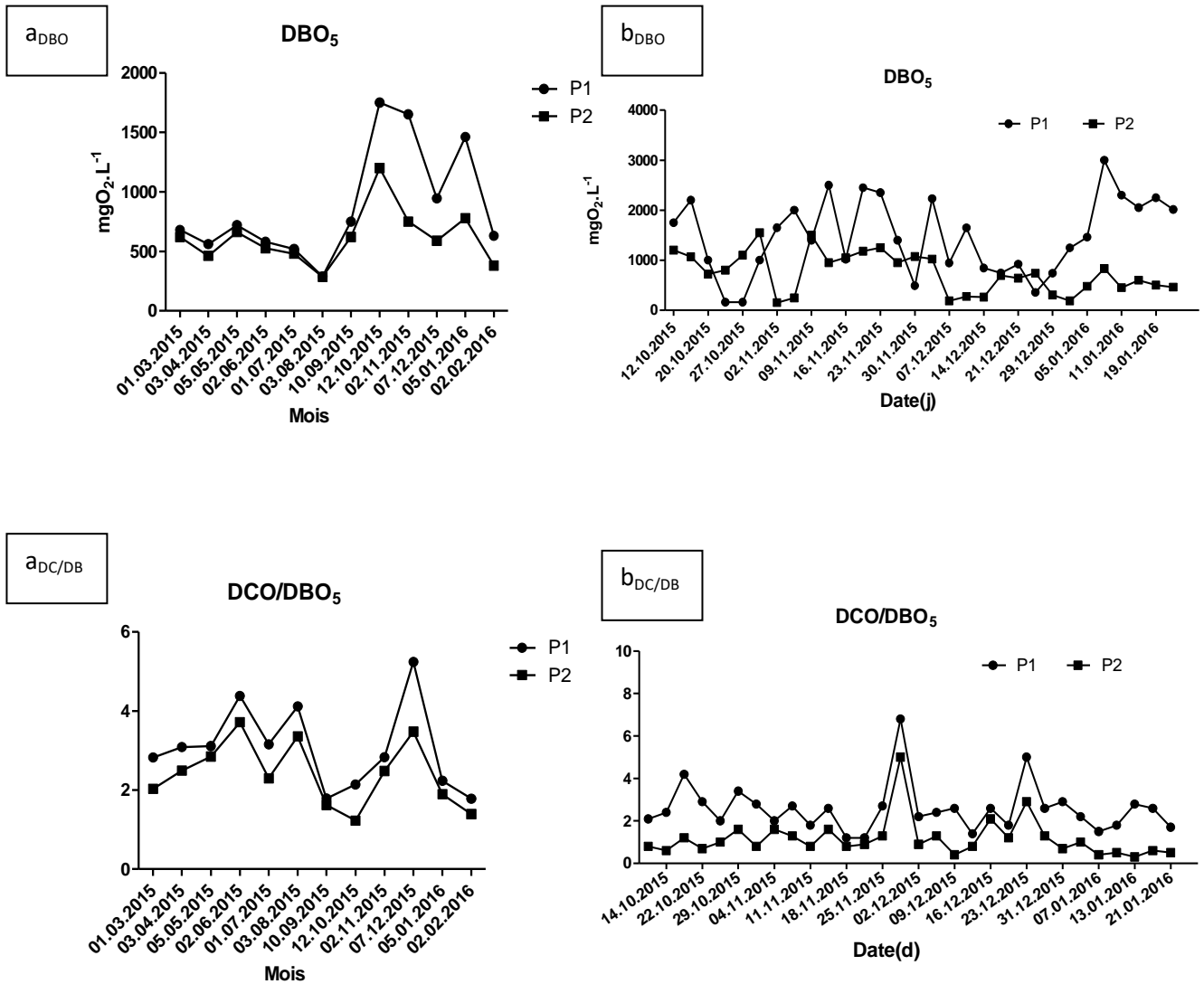


Figure 22 : Spatio-temporel de la qualité physico- chimiques des effluents des deux sites P1 et P2. (a) année 2015/2016 ; (b) octobre 2015 à janvier 2016. . (a_{DBO} ; b_{DBO}) DBO_5 (mg.O₂.L⁻¹.); (a_{DC/DB} ; b_{DC/DB}) DCO/DBO_5

III.1.7. Les Eléments azotés et phosphorés

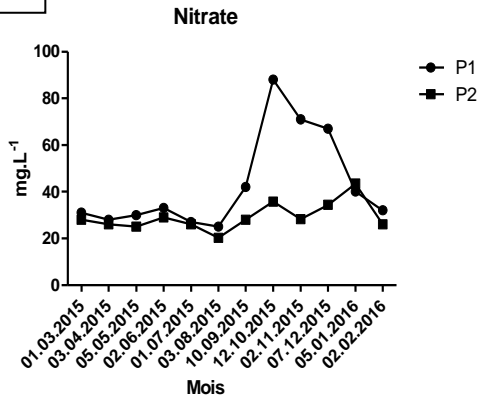
La pollution azotée des effluents, évaluée en nitrites, nitrates et azote kjeldhal, a la même tendance d'évolution pour les trois éléments. D'après la Figure 23 $a_{NO_3^-}$ et $B_{NO_3^-}$, $a_{NO_2^-}$ et $b_{NO_2^-}$ et a_{NTK} et b_{NTK} , nous remarquons une certaine stabilité des éléments azotés pendant l'année 2015/2016, sauf pour la période de l'Aid al Adha. Les concentrations d'éléments azotés sont très élevées pendant cette période (Figure 23 $b_{NO_3^-}$, $b_{NO_2^-}$ et b_{NTK}). Elles avoisinent pour le site P1 les 88 mg.L⁻¹ en nitrate 2.52 mg.L⁻¹ en nitrite et 362.67mg.L⁻¹ en NTK. Pour P2. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 44.61 mg.L⁻¹ en nitrate 1.31mg.L⁻¹ en nitrite et 248.33 mg.L⁻¹ en NTK. En effet, les valeurs moyennes des trois éléments azotés pour les effluents des deux sites P1 et P2 sont respectivement de 56.98, 36.07 mg.L⁻¹ en nitrate, 1.2 ; 1.1mg.L⁻¹ en

nitrite et 251.1 ; 171.7 mg.L⁻¹ en NTK. Dans l'ensemble, les concentrations en nitrate et en nitrite sont proches des normes à l'exception de quelques fluctuations. Les faibles concentrations en nitrite rencontrées dans les eaux usées analysées s'expliquent par le fait que ces ions sont des composés intermédiaires, instables en présence de l'oxygène, dont la concentration est généralement beaucoup plus faible que les autres formes qui lui sont liées (Belghyti et al., 2009) . Par contre, celles évaluées en azote total kjeldhal surmontent de 4 fois la valeur limite de la norme 36-15 (40 mg.L⁻¹) (Bulletin Officiel , 2016) pour P2 et de 9 fois pour P1. Ceci pourrait être issu des protéines, des polypeptides, des acides aminés en provenance de la peau des bovins, des fientes des pigeons sauvages utilisées lors du tannage traditionnel, ainsi que de l'urée. La réduction de l'azote en nitrites cause la formation de méthémoglobine qui peut contribuer à la synthèse endogène de composés N-nitrosés (Tahiri et al., 2014).

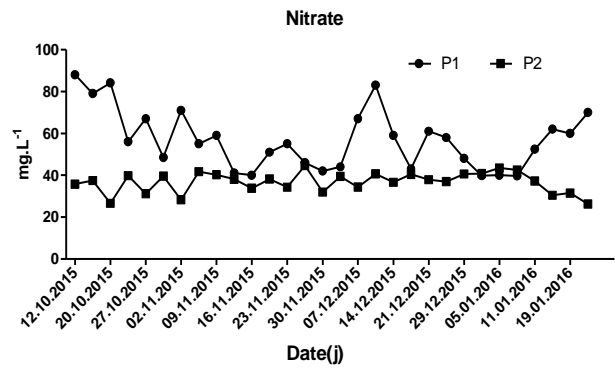
Quant aux ions orthophosphate, ils restent plus ou moins stable pendant la campagne d'échantillonnage (Figure 23 a_{PO43-} et b_{PO43-}) et atteignent un maximum durant la période de l'Aid Al Adha. Pour les effluents des deux sites P1 et P2, les valeurs minimales et maximales sont respectivement (7.5; 18,41 mg.L⁻¹) et (4 ; 6.7 mg.L⁻¹). Les valeurs moyennes sont de l'ordre de 10.94 mg.L⁻¹ (P1) et 5.17 mg.L⁻¹ (P2). Ces valeurs atteignent un maximum pendant l'Aid Al Adha 19.19 mg.L⁻¹ en P1 et 9.6 mg.L⁻¹ en P2. En général, ces concentrations tournent autour de la norme de décharge qui est de 10 mg.L⁻¹. La grande partie de la pollution phosphorée provient, probablement, des détergents d'origines industrielles ou domestiques, des déchets du métabolisme des protéines et de leur élimination sous forme de phosphates dans les urines par l'Homme (Seghairi, 2014).

En effet, les quantités élevées des éléments azotés et phosphorés peuvent conduire à l'eutrophisation, du milieu récepteur (Oued Sebou) qui se traduit par la production d'une biomasse algale excessive et déséquilibrée, ainsi qu'une hypoxie sévère qui résulte de la dégradation de cet excès de matière organique (Aminot et al., 2001).

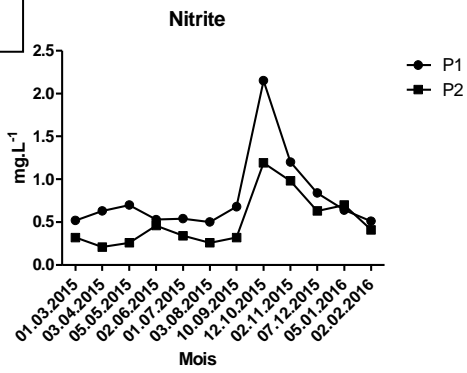
a_{NO₃-}



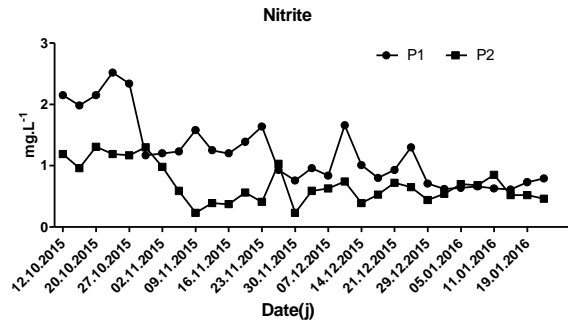
b_{NO₃-}



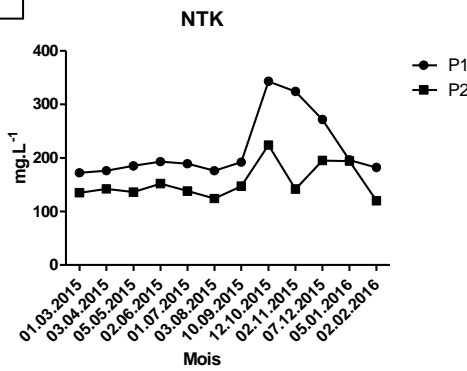
a_{NO₂-}



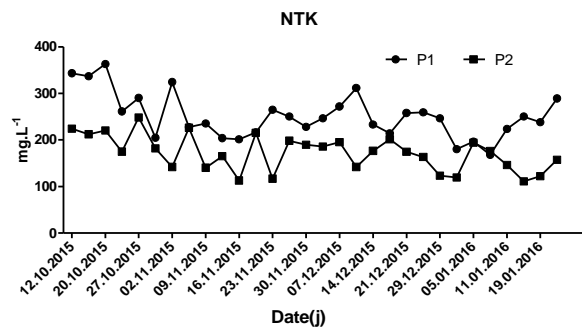
b_{NO₂-}



a_{NTK}



b_{NTK}



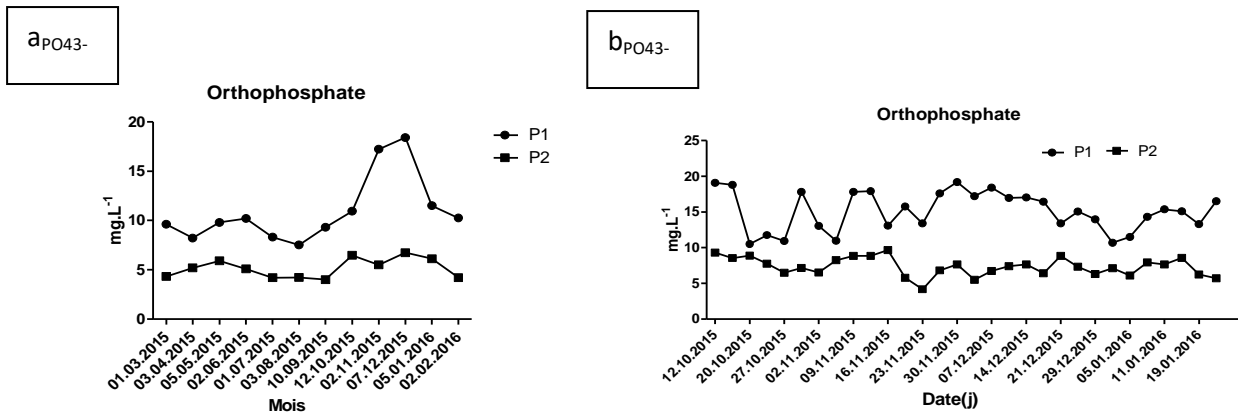


Figure 23 : Suivi spatio-temporel de la charge azoté et phosphiré des effluents des deux sites P1 et P2 (a) année 2015/2016 ; (b) octobre 2015 à janvier 2016. . ($a_{NO_3^-}$; $b_{NO_3^-}$) Nitrate ($mg.L^{-1}$) ; ($a_{NO_2^-}$; $b_{NO_2^-}$) Nitrite ($mg.L^{-1}$) ; (a_{NTK} ; b_{NTK}) NTK ($mg.L^{-1}$) ; ($a_{PO_4^{3-}}$; $b_{PO_4^{3-}}$) Orthophosphate ($mg.L^{-1}$)

III.1.1. Les sulfates

Les figures 24 $a_{SO_4^{2-}}$ et $b_{SO_4^{2-}}$ indiquent que les concentrations moyennes des sulfates (SO_4^{2-}) trouvées durant l'année 2015/2016 dans les deux sites P1 et P2 sont respectivement de 602.5 et 176.2 $mg.L^{-1}$. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées après la période de l'Aid al Adha. La figure 24 $b_{SO_4^{2-}}$ montre des valeurs maximales en octobre 2015 de 1310 $mg.L^{-1}$ en P1 et 390.67 $mg.L^{-1}$ en P2. En outre, la concentration en sulfates dépasse la norme préconisée qui est de 500 $mg.L^{-1}$ (Bulletin Officiel, 2016) en P1. Ces teneurs sont liées à l'utilisation des sels minéraux dans les différentes étapes de traitement des peaux. Ils proviennent principalement de l'étape de picklage destinée à la conservation de la peau pour empêcher le développement des bactéries de putréfaction. Le sulfate de chrome est utilisé comme agent de tannage alors que le sulfate d'aluminium est employé lors de l'étape de déchaulage (Hayzoun et al., 2014)

III.1.2. Les cyanures

En ce qui concerne les concentrations en cyanure, présentées dans les figures 24 a_{CN^-} et b_{CN^-} , elles sont excessivement élevées dans les effluents des deux sites P1 et P2 par rapport à la norme de rejet des eaux usées (0,1 $mg.L^{-1}$). La variation de ce paramètre est très importante elle passe de 13 à 358 $mg.L^{-1}$ en P1 et de 0.17 à 207 $mg.L^{-1}$ en P2 (Figure 24 a_{CN^-}) et atteint comme valeur maximale les 989.3 $mg.L^{-1}$ (P1) et 211.8 $mg.L^{-1}$ (P2) durant la période de l'Aid Al Adha (Figure 23 b_{CN^-}). Ceci pourrait être issu des bassins des cyanures utilisés dans les dinanderies ou aussi des teintures et des vernis à base des cyanures pour la peinture des tissus de la peau, des articles en poteries, de textiles,...

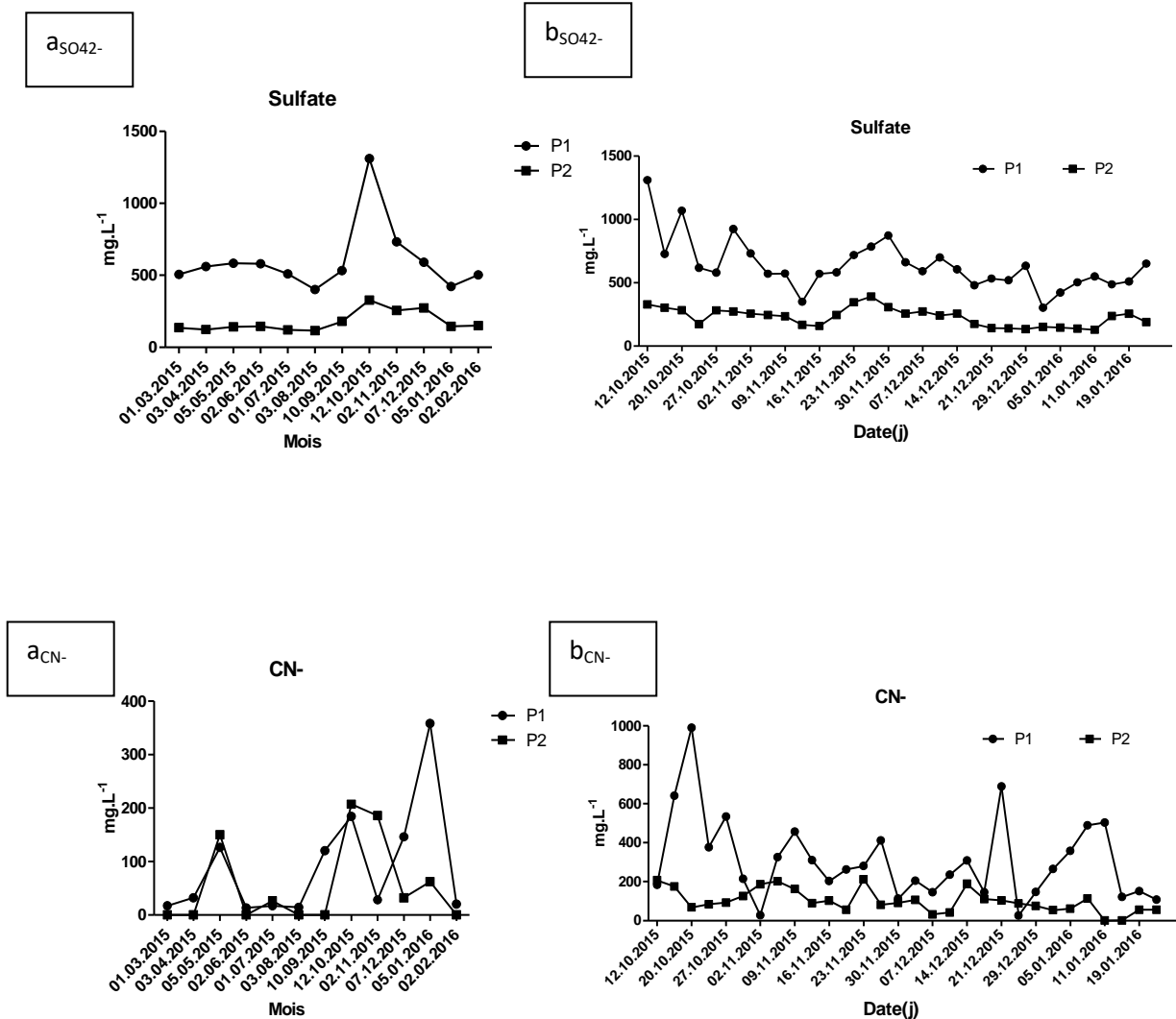


Figure 24; Suivi spatio-temporel de la charge minérale des effluent des deux sites P1 et P2. (a) année 2015/2016 ; (b) octobre 2015 à janvier 2016. (a_{SO42-} ; b_{SO42-}) Sulfate ($mg.L^{-1}$); (a_{CN-} ; b_{CN-}) Cyanure ($mg.L^{-1}$)

III.1.3. Les Eléments métalliques

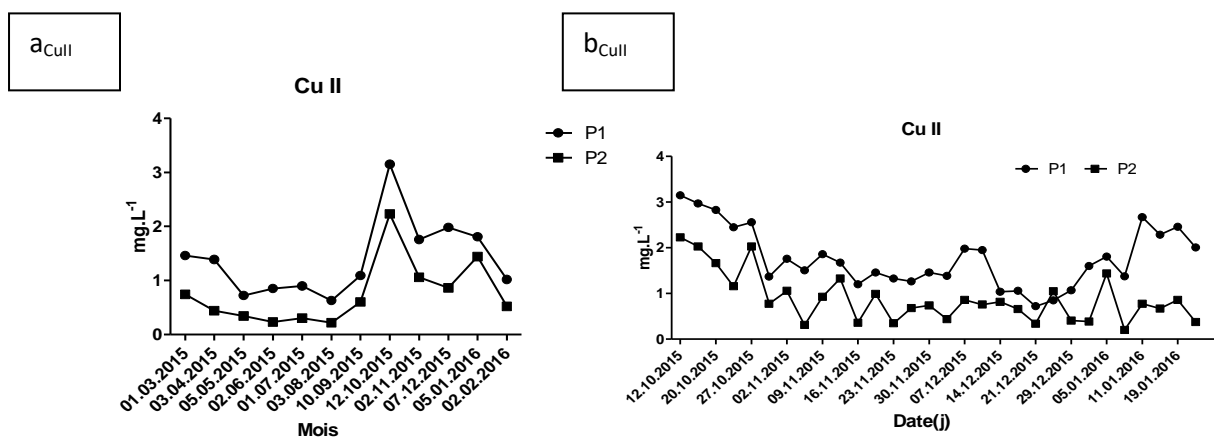
Les éléments métalliques suivis durant l'année 2015/2016 sont l'ion cuivrique Cu^{II} , le chrome hexavalent et trivalent : Les concentrations de Cu^{II} dans les deux sites d'échantillonnage (Figure 25 a_{CuII} et b_{CuII}), montrent des variations très importantes au niveau de l'ion cuivrique en fonction du temps, qui oscillent entre 0,63 et 3.15 $mg.L^{-1}$ (P1) et 0.22 et 2.23 $mg.L^{-1}$ (P2). La moyenne de Cu^{II} après la période de l'Aid Al Adha (Figure 25 b_{CuII}) est de 1.4 $mg.L^{-1}$ dans le site P1 et 0.75 $mg.L^{-1}$ dans le site P2.

Les Figures 25 a_{CrIII} et a_{CrVI} illustre l'effet du temps sur Cr^{III} et Cr^{VI} sur les deux sites P1 et P2. Le Cr^{VI} au chrome hexavalent varie entre 0,28 - 2,5 $mg.L^{-1}$ en P1 et 0,12 - 1,85 $mg.L^{-1}$ en P2 durant l'année 2015/2016. Les moyennes du Cr^{VI} présent après la période de l'Aid Al Adha

(Figure 25 b_{CrVI}) dans les deux sites P1 et P2 sont respectivement de 1.65 et 0.87 mg.L⁻¹. Ces niveaux sont supérieurs à la norme 36-15 de rejets (0,1 mg.L⁻¹) (Bulletin Officiel , 2016).

Le Cr^{III} est compris entre 4.12 et 482 mg.L⁻¹ en P1 et entre 0.03 et 38 mg.L⁻¹ en P2 (Figure 25 a_{CrIII}). La moyenne de Cr^{III} durant la période après l'Aid Al Adha (Figure 25 b_{CrIII}) est de 114.9 mg.L⁻¹ en P1 et 13.52 mg.L⁻¹ en P2. 115 mg.L⁻¹ P1 et entre 0,05 et 38,4 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 13,51 mg.L⁻¹ en P2. D'après les figures nous pouvons remarquer des variations très importantes en fonction du temps qui sont dues probablement à la nature et la fréquence journalière des activités artisanales du quartier. De plus, les concentrations très élevées du chrome surtout en P1 (rejet des tanneries) approuvent les résultats trouvés par Hayzoun (Hayzoun et al., 2014) qui démontrent que le rejet le plus chargé en chrome est celui des tanneries à cause de la consommation excessive de sulfate de chrome et d'autres produits chimiques toxiques.

Seul le chrome trivalent, employé sous forme de sulfate de chrome III a une action de tannage et permet la transformation de la peau brute en cuir. La spéciation du chrome (VI) et (III) dépend de plusieurs paramètres, tels que le pH, la concentration et la disponibilité du ligand. Quand le pH du milieu est compris entre 8 et 10, le chrome hexavalent est principalement sous forme de CrO₄²⁻. La réduction du chrome hexavalent est possible dans des milieux à faible teneur en oxygène (Samaké, 2008).



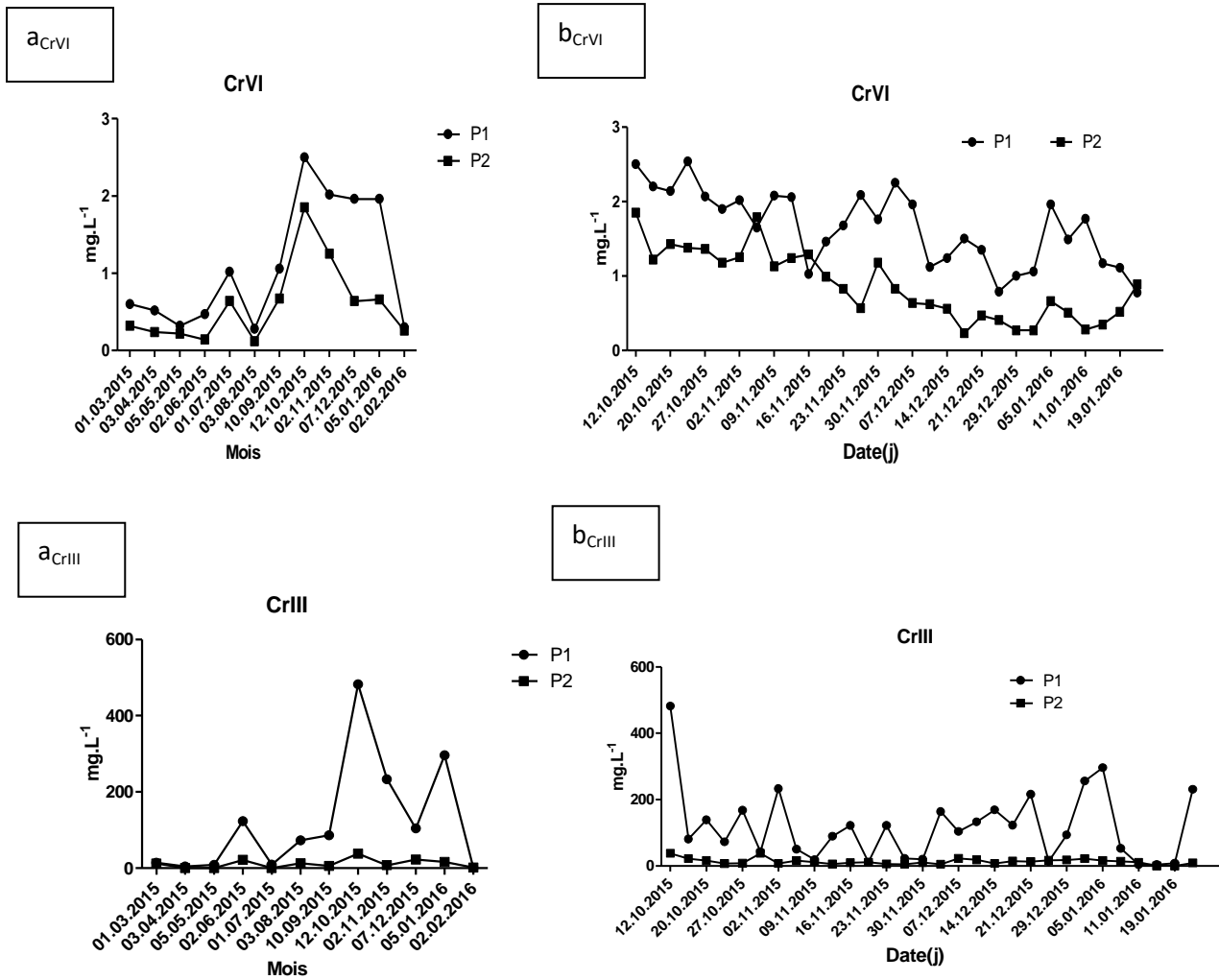


Figure 25: Suivi spatio-temporel de la charge métallique des effluents des deux sites P1 et P2. (a) année 2015/2016 ; (b) octobre 2015 à janvier 2016. (a_{CrIII}; b_{CrIII}) ion cuivrique (mg.L⁻¹); (a_{CrVI}; b_{CrVI}) Chrome hexavalent (mg.L⁻¹); (a_{CrIII}; b_{CrIII}) Chrome trivalent (mg.L⁻¹)

III.1.4. Charge moyenne de P1 et P2 illustrées par les cartes thématiques du SIG

Les figures 26 et 27 récapitulent les résultats de la charge moyenne de pollution des deux sites P1 et P2 en mg.L⁻¹ et en kg.J⁻¹. Le flux en Kg.J⁻¹ est calculé à partir de la concentration moyenne (C) des paramètres en mg.L⁻¹ multipliée par la moyenne du débit (D) en m³.J⁻¹

$$\text{Flux} = (C * D) / 1000 \quad \text{Équation 27}$$

L'analyse de la figure 26 montre que la concentration des paramètres suivis dans les effluents du site P1 est plus élevée par rapport au P2. Les valeurs accentuées de DBO₅ et de DCO révèlent une grande concentration en matière organique dans les deux des sites P1 et P2. De plus, ces effluents présentent également une forte charge en MES, TKN, CN⁻ et en chrome trivalent.

En termes de flux, la figure 27 révèle que l'impact du site P₂ sur l'environnement est plus intense que celui du P₁. Cela s'explique par le fait que le débit des effluents émanant de l'ancienne Médina est supérieur à celui relatif aux rejets des tanneurs du quartier d'Ain Nokbi. Les valeurs moyennes en kg par jour sont de l'ordre de 2011 Kg.j⁻¹ en P₂ et 504 Kg.j⁻¹ en P₁ de DCO, presque 175 Kg.j⁻¹ de DBO₅ en P₁ et 966 Kg.j⁻¹ en P₂, 17 Kg.j⁻¹ de cyanure en P₁ et plus de 87 Kg.j⁻¹ en P₂, 451 Kg.j⁻¹ en P₁ et 1161 Kg.j⁻¹ de MES en P₂, plus de 43 Kg.j⁻¹ de NTK en P₁ et presque 323 Kg.j⁻¹ en P₂, près de 23 Kg.j⁻¹ Cr^{III} en P₁ et plus de 18 Kg.j⁻¹ en P₂.

Ce calcul de la charge polluante globale des effluents étudiés confirme leur mauvaise qualité, ce qui expose les acteurs à différents risques et crée des désagréments à la ville. En effet, ces résultats alarmants participent à la dégradation de l'environnement urbain de la ville de Fès Aussi, il est important de mettre en place une gestion d'efficente afin de pallier aux problèmes que posent ces rejets.

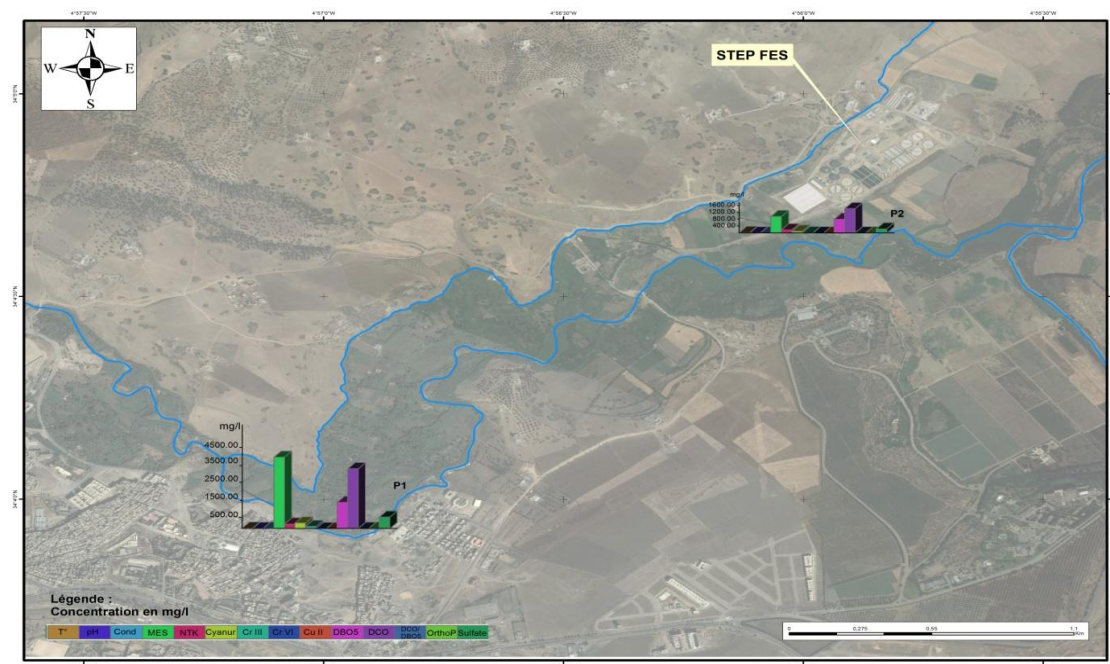


Figure 26: Concentrations en (mg.L-1) des paramètres physico-chimiques des effluents des deux sites de prélèvement P1 et P2

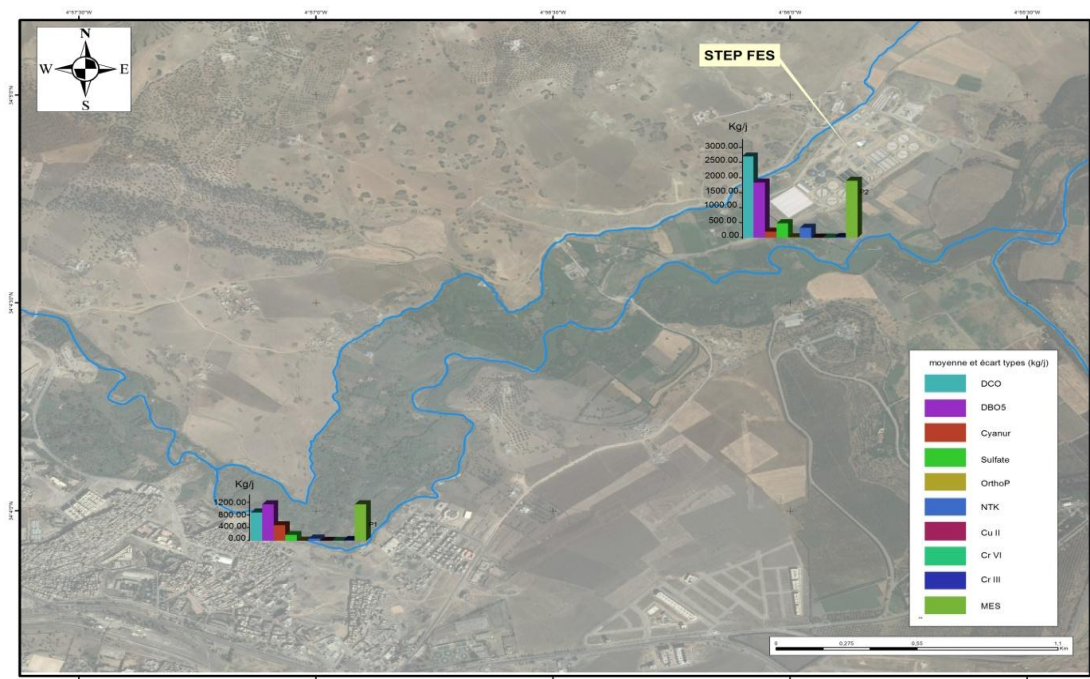


Figure 27: Flux en (Kg.J^{-1}) des paramètres physico-chimiques des effluents des deux sites de prélèvement P1 et P2

Il est donc nécessaire de prévoir un prétraitement au préalable de ces effluents pour pouvoir les rejoindre au collecteur correspondant à l'entrée de la station d'épuration des eaux usées STEP tout en répondant aux normes de qualité des eaux à traiter par la boue activée. Ceci fera l'objet du chapitre IV qui propose trois méthodes de traitements de ce type d'effluents.

III.2. Analyse Statistique des résultats expérimentaux

Les méthodes statistiques multivariées sont utiles pour l'interprétation de l'ensemble des données de la qualité des eaux, en évaluant les mesures redondantes dans l'environnement, permettant ainsi la classification et le regroupement des polluants selon leurs sources, en atteignant un petit nombre de facteurs sous-jacents sans perdre trop d'informations (Ben Ali R. 2015).

III.2.1. Analyse de la Variance (ANOVA)

Une analyse de la variance a été menée pour étudier la variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques. Tout d'abord, nous avons analysé l'évolution de chaque paramètre en fonction du temps. Ensuite, nous avons étudié la variation de ces paramètres en fonction des sites. Le tableau 8 présente les résultats du test analytique uni varié, modèle fixe

appliqué à chacune des 16 variables mesurées au cours de la période étudiée, s'étalant du 01/03/2015 au 03/02/2016, durant toute l'année 2015/2016.

L'analyse de la variance ANOVA a pour but de comparer entre les sites de prélèvement et l'égalité des moyennes de chaque paramètre mesuré pendant la période de l'étude, autrement dit, cette analyse permet d'identifier l'existence des différences entre les sites étudiés et les différentes campagnes de prélèvements.

Tableau 8: Analyse de la variance ANOVA des paramètres physico-chimiques des effluents des sites P1 et P2 en fonction du temps

Paramètres	Sites				Temps			
	M.S	F	P value summary	Significant	M.S	F	P value summary	Significant
Débit	11640000	1024	P<0.0001 ***	Oui	13780	1,212	0,05068*	Oui
Température	0,7668	1,075	0,3220 ns	Non	25,94	36,38	P<0.0001 ***	Oui
pH	5,042	29,83	0,0002 ***	Oui	0,9165	5,422	0,0046 *	Oui
CE	960,9	79,94	P<0.0001 ***	Oui	21,88	1,820	0,1676 ns	Non
DCO	9477000	9,641	0,0009 ***	Oui	1484000	3,189	0,0335*	Oui
DBO ₅	422900	19,54	0,01 *	Oui	239300	5,455	0,0045 **	Oui
NTK	23500	21,51	0,0007 ***	Oui	3636	3,328	0,0290**	Oui
Nitrate	1118	6,651	0,0256 *	Oui	298,9	1,777	0,1772 ns	Non
Nitrite	0,4704	14,20	0,0031**	Oui	0,2865	8,646	0,0006 ***	Oui
Orthophosphate	200,1	47,35	P<0.0001 ***	Oui	8,402	1,988	0,1349 ns	Non
Sulfate	1090000	62,95	P<0.0001 ***	Oui	44520	2,571	0,036 *	Oui
Cuivre II	2,522	85,16	P<0.0001 ***	Oui	0,8264	27,90	P<0.0001***	Oui
Chrome VI	1,500	16,12	0,0020**	Oui	0,8250	8,866	0,0005***	Oui
Chrome III	70020	7,221	P<0.0001 ***	Oui	12420	1,280	0,04725*	Oui
Cyanure libre	11330	1,932	P<0.0001 ***	Oui	7025	1,198	0,03577*	Oui
MES	14000000	21,21	0,0008 ***	Oui	1044000	1,582	0,2296 ns	Oui

$p > \alpha = 0,05$: (ns) différences non significatives

$p < \alpha = 0,05$: (*) différences juste significatives

$p < \alpha = 0,01$: (**) différences hautement significatives

$p < \alpha = 0,001$: (***) différences très hautement significatives

F: valeur F de Fisher ; M.S : moyenne quadratique

La valeur de P indique la probabilité du test Fisher; qui est un rapport des deux variances inter et intragroupe, l'hypothèse nulle est vraie quand $P < 0,05\%$ (Xiao, Halbach, Simcik, & Gulliver, 2012).

Le tableau 8 illustre les résultats des moyennes quadratiques appliquées à l'étude des variations spatio-temporelles des paramètres physico-chimiques. Nous observons que les moyennes quadratiques (M.S) du facteur site de tous les paramètres sont supérieures à celle

du facteur temps (Débit_(site) MS: 11640000 , Débit_(temps) MS: 13780 ; DCO_(site) Ms: 9477000, DCO_(temps) MS: 1484000, etc.).

Les résultats du tableau révèlent l'existence des différences très hautement significatives ($P < 0.0001$) entre les deux sites de prélèvement P1 et P2 pour presque tous les paramètres analysés à savoir le : Débit, CE, PO_4^{2-} , SO_4^{2-} , Cu^{II} , Cr^{III} , CN^- . Pour la DBO_5 , NO_2^- , NO_3^- , Cr^{6+} leur variation est entre hautement significative et juste significative. Cependant, pour la température, nous pouvons accepter l'hypothèse nulle (valeur $P = 0,32$), ce paramètre varie de façon non-signifiante avec les sites d'échantillonnage. Par contre, il varie d'une façon très hautement significative avec le temps ($P < 0.0001$).

Nous retenons de ces résultats que le facteur temps a une grande influence sur la plupart des paramètres analysés (Débit, pH, DCO, DBO_5 , NTK, NO_2^- , SO_4^{2-} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{6+} , CN^- , MES). Bien que, les paramètres restants CE, NO_3^- , PO_4^{2-} ne varient pas significativement avec le temps, leurs valeurs de P est supérieures à 0,05%.

Nous concluons que le facteur site a plus d'influence sur chacun des paramètres étudiés que le temps, puisque la moyenne quadratique de tous les paramètres du site est supérieure à celle du temps. La plupart des paramètres varient considérablement avec les sites d'échantillonnage et le temps. En effet, les effluents des deux sites de prélèvement n'ont pas les mêmes origines ni les même activités anthropiques. Les différences significatives constatées sont liées à la nature de l'activité dans chaque site, aux différents types d'effluents rejetés chaque jour et aux caractéristiques propres à chaque milieu (Ben Ali Rim, 2015). La température est hautement corrélée avec le temps puisque qu'il ne dépend que du climat de la région (Cristóvão et al., 2016).

III.2.2. L'Analyse en Composante Principale (ACP)

L'ACP est une technique statistique qui transforme l'ensemble d'origine de variables intercorrélées en un nouvel ensemble avec un petit nombre de variables indépendantes non corrélées ou des composants principaux (PC) qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine et représentent la majeure partie de la variance variables observées (Pettus et al., 2015).

L'ACP est réalisée avec les paramètres des échantillons du site P1 et P2. La figure 28 présente les résultats obtenus. Les deux premiers axes ont été retenus pour la représentation graphique des résultats pour chaque type de variabilité. Les deux axes expliquent 78.86 % de l'information contenue dans la matrice de données.

Tableau 9: Indice KMO et test de Bartlett

Mesure de précision de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin.		,807
	Khi-deux approximé	560,659
Test de sphéricité de Bartlett	Ddl	120
	Signification de Bartlett	,000

L'indice KMO est de 0,807 (Tableau 9). Nous pouvons alors juger que les corrélations entre les items sont excellentes. Ensuite, le résultat du test de sphéricité de Bartlett est significatif ($p < 0,0005$). Nous pouvons donc dire que les corrélations ne sont pas toutes égales à zéro. Les variables sont dépendantes les unes des autres.

L'examen des résultats numériques de l'ACP (figure 28) montre que les paramètres DBO_5 , PO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , Cr^{III} , Cr^{VI} , Cu^{II} , , MES, pH, SO_4^{3-} , NTK , DCO sont en corrélation positive croissante allant de 0.43 jusqu'au 0,91 sur l'axe F1 qui représente 42,2% de l'inertie . Ces derniers s'opposent sur le même axe avec la température (-0,86), la conductivité (-0.90) et le débit (0,91) liés négativement à la première composante. Tandis que les Cyanures (0,96) sont liés positivement sur la deuxième composante qui représente 36.64 % de l'inertie globale.

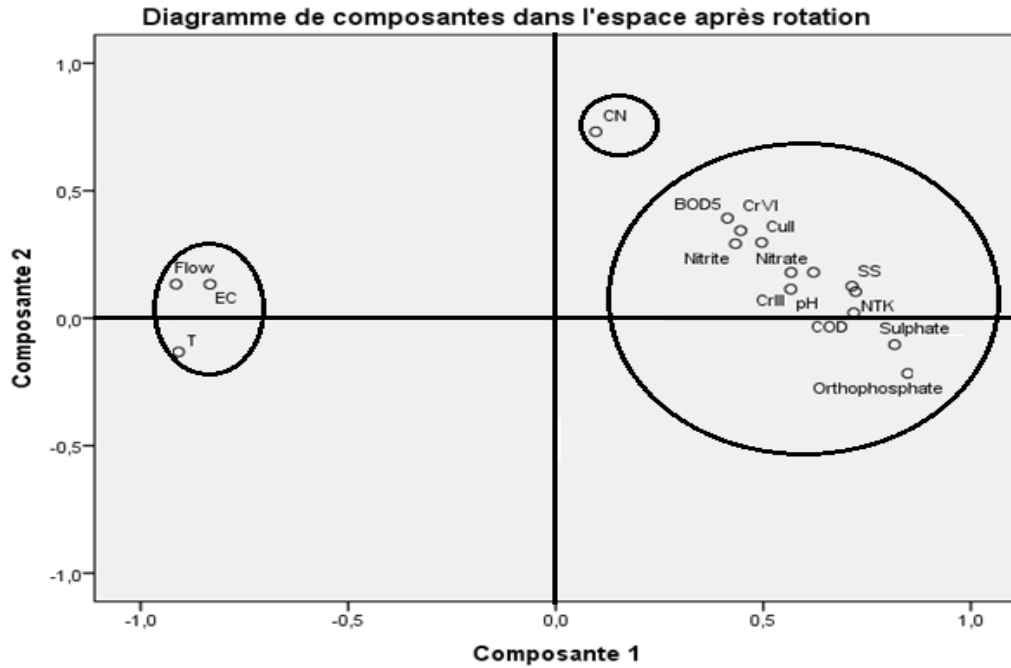


Figure 28: Projection des facteurs physico-chimiques des effluents sur le plan des deux premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales. Avec : Flow = Débit ; EC = Conductivité ; T = température ; CN = cyanure ; SS = MES

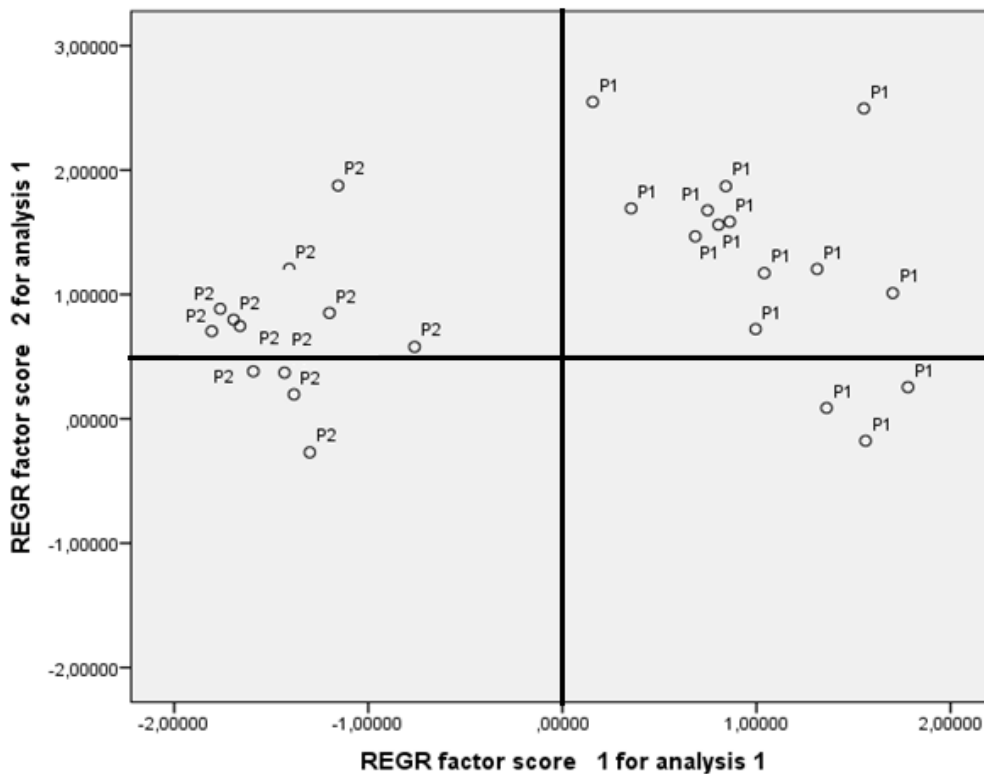


Figure 29: Projection des sites P1 et P2 sur le plan des 2 premiers axes factoriels de l'ACP d'une matrice Sites/Caractéristiques physico-chimiques des effluents.

Le regroupement et le positionnement des variables dans les cercles de corrélation nous permettent de distinguer trois groupes de variables : le premier est lié positivement à la

première composante F1 que nous pouvons nommer paramètres chimiques, qui englobe la plupart des paramètres chimiques indiquant la qualité de l'eau. Alors que le deuxième groupe qu'on peut appeler paramètres physiques s'oppose aux paramètres chimiques sur la même composante. Le troisième groupe se constitue de la variable cyanure liée à l'axe F2 et qui varie indépendamment des autres paramètres.

La figure 29 présente la projection des sites P1 et P2 sur le plan des deux premiers axes factoriels de l'ACP d'une matrice sites/Caractéristiques physico-chimique des effluents. Il apparaît clairement que l'ensemble des descripteurs chimiques présentent des variations importantes sur le site P1. Tandis que les variations les plus importantes, sur le site P2, sont celles du groupe 2 paramètres physique.

En effet, les effluents des rejets des tanneries présentent généralement des variations importantes qui dépendent de l'étape du tannage. Les tanneries de la zone de Ain Nokbi ne travaillent pas d'une façon synchronisée, le rejet du collecteur rassemble alors les rejets de toutes les étapes ce qui permet à la plupart des paramètres chimiques de se rassembler et de dépendre les uns des autres. Les cyanures dépendent essentiellement des rejets de teinture et des bassins de dinanderies. L'existence de ce paramètre est occasionnelle donc sa variation est indépendante des autres paramètres. Le site P2, collecteur des rejets industriels et domestiques de la zone, englobe les rejets d'une zone très vaste dont le débit est incontrôlable et qui dépend fortement de l'activité anthropique journalière. Ce qui influence, d'une façon très significative, la variation du débit.

IV. Conclusion

Les résultats du diagnostic d'assainissement de la ville de Fès révèlent les points véhiculant les effluents les plus pollués et qui sont : le bassin Massira, le bassin Wifaq, le quartier Bab El Khoukha, le bassin Sidi Brahim, l'amont de Boufkran, le quartier Dokkarat, l'Oued Zhoun, le Chenal des tanneurs de Ain Nokbi, le Chenal de la ville nouvelle, l'ancienne Médina.

Les effluents des 10 points étudiés sont neutres exceptés les deux sites les plus pollués: Le chenal des tanneurs de l'Ain Nokbi (P1) et le chenal de l'ancienne Médina (P2). Ils ont une température comprise entre 23.05 et 24.1°C et portent une charge organique, minérale et métallique qui répond aux normes de rejet des effluents dans les cours d'eaux (Bulletin Officiel , 2016). A l'exception des effluents des sites suscités. Ces derniers se caractérisent par une très forte charge organique non biodégradable ($DCO/DBO_5 > 3$), avec un taux de DCO de plus de 33 fois pour P1 et 20 fois pour P2, une charge minérale dépassant