

THÈSE

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat

Présentée par: **BENMOSTEFA SOUMIA**

Intitulé

*Etude et suivi de la pollution métallique dans les sédiments en aval d'oued
TAFNA (wilaya de Tlemcen et de Ain Temouchent)*

*Faculté : Chimie
Département : Chimie physique
Domaine : Science et technologie (ST)
Filière : Génie des procédés
Intitulé de la Formation : Chimie industrielle environnementale*

Soutenue publiquement le jeudi 17/11/2022 à 10H00

Devant le Jury Composé de:

<i>Membres de Jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Domiciliation</i>
<i>Mrs Bendraoua. A</i>	<i>Professeur</i>	<i>Président</i>	<i>USTOMB</i>
<i>Mme Dali Youcef. N</i>	<i>Professeur</i>	<i>Encadrant</i>	<i>Univ-Tlemcen</i>
<i>Mrs Hadjel. M</i>	<i>Professeur</i>	<i>Co-Encadrant</i>	<i>USTOMB</i>
<i>Mrs Bestani .B</i>	<i>Professeur</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-Mostaganem</i>
<i>Mrs Daaou .M</i>	<i>Professeur</i>	<i>Examineur</i>	<i>USTOMB</i>

Année Universitaire: 2022/2023

Remerciements

Tout d'abord, je loue et remercie Dieu de m'avoir accordé le succès pour cette journée, qui est l'un de mes rêves, et de m'avoir donné la force de terminer ce travail malgré tout (الحمد لله)

Je remercie **mes parents**, en particulier ma mère, qui s'est sacrifiée et a enduré pour que j'en arrive là. Je remercie ma chère sœur **HAFIDA**, qui est comme une deuxième mère, pour son soutien et son aide pour moi et pour m'avoir soutenu en toutes circonstances. Je remercie mon frère **ABDELHAFID** pour son soutien, mon frère **Menouar** et **Abd al-Rahman** pour m'avoir aidé à mener à bien ce travail (notamment lors des sorties de oued).

J'adresse mes grands remerciements à mon cher époux **Moulay**, pour son soutien, son aide et sa compréhension.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice de mémoire, Madame **Dali youcef.N** Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé, et mon co-encadreur **Mr Hadjel.M** qui était toujours là pour m'aider, m'orienter et de son appui scientifique.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à monsieur **Bendraoua. A**, professeur à l'université des sciences et de la technologie, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury d'examen dans ce travail.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à Monsieur **Bestani. B**, professeur à l'université de Mostaganem.

Je suis honorée de la présence au titre d'examineur Monsieur **Daaou. M** professeur à l'université des sciences et de la technologie.

Je remercie tous les membres de mes deux laboratoires Laboratoire des Sciences, Technologie et Génie des Procédés LSTGP-ORAN

Laboratoire Valorisation des Action de l'Homme pour la Protection de l'Environnement et Application en Santé Publique - TLEMCEN

Mes sincères remerciements au équipes de ALZINC GHAZAOUET de m'avoir accueil au sein de son laboratoire pour réaliser les différentes analyses de métaux.

Liste des figures

Figure I.1: Schématisation du cycle hydrologique des métaux traces en milieu aqueux....	7
Figure II.1: bassin versant de la Tafna prise pendant l'échantillonnage.....	14
Figure II.2 : La Tafna parmi les bassins de l'Algérie.....	15
Figure II.3 : Cadre Géographique de bassin versant de la TAFNA.....	15
Figure II.4 : les sous bassins versant de la Tafna.....	16
Figure II.5 : Réseau hydrographique.....	17
Figure III-1 : Les cinq stations de prélèvements.....	21
Figure III-2 : Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (SAAF).....	24
Figure IV.1 : Variations mensuelles des températures de l'eau et de l'air.....	32
Figure IV.2 : Variations mensuelles du pH.....	34
Figure IV.3 : Variations mensuelles des conductivités.....	35
Figure IV.4: Variations mensuelles de la Salinité (g/l).....	36
Figure IV.5: Variations saisonnières des températures de l'eau et de l'air.....	37
Figure IV.6 : Variations saisonnières du pH.....	38
Figure IV.7: Variations saisonnières des conductivités	39
Figure IV.8: Variations saisonnières des Salinités.....	40
Figure IV.9 : Variations spatiales des températures de l'eau et de l'air.....	41
Figure IV.10 : Variations spatiales du pH.....	42
Figure IV.11 : Variations spatiales des conductivités $\mu\text{S}/\text{cm}$	42
Figure IV.12 : Variations spatiales des Salinités.....	43
Figure IV.13: Variations mensuelles des concentrations en fer (mg/l) dans l'eau.....	45
Figure IV.14: Variations mensuelles des concentrations de cuivre (mg/l) dans l'eau.....	45
Figure IV.15: Variations mensuelles des concentrations de nickel (mg/l) dans l'eau.....	46
Figure IV.16 : Variations mensuelles des concentrations du plomb en (mg/l) dans l'eau..	47
Figure IV.17 : Variations mensuelles des concentrations du zinc (mg/l) dans l'eau	48
Figure IV.18: Variations mensuelles des concentrations du cadmium (mg/l) dans l'eau	49
Figure IV.19: Variations saisonnières des concentrations moyennes des métaux (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) dans l'eau.....	51
Figure IV.20 : Variations spatiales des concentrations moyennes des métaux (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) dans l'eau.....	53
Figure IV.21 : Variations mensuelles des concentrations de Fer dans les sédiments.....	57
Figure IV.22 : Variations mensuelles des concentrations de Cuivre en mg/kg dans les	

sédiments.....	58
Figure IV.23 : Variations mensuelles des concentrations de Zinc en mg/kg dans les sédiments	59
Figure IV.24 : Variations mensuelles des concentrations de Nickel en mg/kg dans les sédiments	60
Figure IV.25 : Variations mensuelles des concentrations du plomb en mg/kg dans les sédiments	61
Figure IV.26 : Variations mensuelles des concentrations de Cadmium en mg/kg dans les sédiments	62
Figure IV.27 : Variations saisonnières des concentrations des métaux (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) dans les sédiments	64
Figure IV.28 : Variations spatiales des concentrations moyennes annuelles des métaux (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) dans les sédiments	66
Figure IV.29 : Plan factoriel engendré par les deux premiers axes de l'ACP calculés à partir des teneurs métalliques dans les eaux et les sédiments de surface des différents points de prélèvement	72
Figure IV.30 : Plan factoriel engendré par les deux premiers axes de l'ACP calculés à partir paramètres physicochimiques dans les eaux de surface des différents points de prélèvement	74
Figure IV.31 :Dendrogramme des teneurs métalliques dans les eaux et les sédiments de surface des différents points de prélèvement	76
Figure IV.32 :Dendrogramme paramètres physicochimiques dans les eaux de surface des différents points de prélèvement	77

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Concentration ($\mu\text{g/g}$) de quelques ETM dans la croûte terrestre.....	5
Tableau I.2 : Sources principales des contaminants métalliques.....	6
Tableau I.3 : Temps de demi-vie biologique de quelques éléments.....	8
Tableau II.1 : Inventaire de quelques unités industrielles.....	20
Tableau III-1 : Les longueurs d'ondes des différents métaux	25
Tableau III.2 : Evaluation de la contamination métallique à partir d'Igéo, d'après Muller(1981).....	27
Tableau III.3 : Catégories des facteurs d'enrichissements.....	28
Tableau III.4 : Les classes de facteur et degré de contamination.....	28
Tableau III.5 : Evaluation de la contamination métallique à partir d'indice de charge de pollution (PLI).....	29
Tableau III.6 : Classification de la qualité des sédiments selon E_r^1 et PER	30
Tableau IV.1 : résultats d'analyse FRX des sédiments.....	55
Tableau IV.2 : Valeurs de l'indice de géoaccumulation des ETM dans les cinq stations....	68
Tableau IV.3 : Valeurs du facteur d'enrichissement dans les cinq stations.....	69
Tableau IV.4 : Facteurs et degrés de contamination.....	69
Tableau IV.5 : Valeurs de L'indice de charge de pollution (PLI) associé à chaque station.....	70
Tableau IV.6 : Valeurs du coefficient de risque écologique E_r^1 pour chaque élément et de l'indice de risque écologique (PER) associé à chaque station	70
Tableau IV.7 : Etude comparative entre les concentrations métalliques dans l'eau de l'Oued Tafna et quelques oueds dans la littérature.....	78
Tableau IV.8 : comparatives des différentes concentrations des métaux dans les sédiments oued Tafna avec la littérature et les valeurs de fond (Turekian et Wedepohl 1961).....	79

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
 Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1 Les éléments traces métalliques.....	4
I.1.1 Origine des éléments traces métalliques	5
I.1.2 Cycle des éléments traces métalliques dans l'environnement aquatique	6
I.1.3 Toxicologie des métaux lourds	7
I.2 La pollution des eaux de surface	9
I.2 1- Les différents types de pollution	9
I.2 1.1 La pollution chimique.....	9
I.2 1.2 La pollution physique.....	10
I.2 1.3 La pollution microbiologique.....	10
I.2 2 Evaluation de la qualité des eaux de surface.....	10
I.2 2.1 Température.....	10
I.2 2.2 Potentiel d'hydrogène (pH).....	10
I.2 2.3 Conductivité électrique (CE).....	11
I.2 2.4 Salinité.....	11
I.2.3 ETM l'eau.....	11
I.3 Les sédiments.....	11
I.3.1 Granulométrie	12
I.3.2 Composition des sédiments.....	11
I.3.3 La texture des sédiments.....	13
I.3.4 ETM dans les sédiments	13
 Chapitre II : PRESENTATION DES SITES D'ETUDE	
II.1. Présentation du bassin versant de la Tafna.....	14
II.1.1 Position géographique	14
II.1.2 Délimitation du bassin.....	16
II.1.3 Les sous-bassins.....	16
II.1.4 Hydrographie.....	17
II.1.5 Climatologie.....	18
II.1.6 Occupation des sols	18

II.1.7 Les activités anthropiques dans le bassin versant.....	18
II.1.7.1 Activités agricoles.....	18
II.1.7.2 Activité Industrielles.....	19

Chapitre III : MATERIEL ET METHODES

III.1.Echantillonnage	21
III.1.1 Choix des points de prélèvement.....	21
III.1.2.Choix des échantillons et contaminants.....	22
III.1.3 Prélèvement.....	22
III.1.3.1 Prélèvement d'eau.....	22
III.1.3.2 Prélèvement des sédiments.....	22
III.2 Traitement des échantillons et technique d'analyse.....	22
III.2.1 L'eau.....	22
III.2.2 Les sédiments.....	23
III.2.2.1 Séchage, broyage et tamisage	23
III.2.2.2 Minéralisation	23
III.2.2.3 Dosage des métaux lourds.....	24
III.2.2.4 Analyses par spectrométrie de fluorescence X.....	25
III.3 Estimation des contaminations	26
III.3.1 Calcul des indices.....	26
III.3.1.1 Indice de géoaccumulation	26
III.3.1. 2 Facteur d'enrichissement.....	27
III.3.1.3 Facteur et degrés de contamination.....	28
III.3.1.4 Indice de charge de pollution (PLI).....	29
III.3.1.5 Indice de risque écologique potentiel (PER).....	29
III. 4 L'analyse statistique	30
III.4.1 Analyse des variances (ANOVA).....	30
III.4.2 Analyse des composantes principales (ACP).....	31
III.4.3 Classification ascendante hiérarchique (CAH).....	31

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Les paramètres physico-chimiques de l'eau.....	32
IV.1.1-variations mensuelles	32

IV.1.1.1	Température de l'eau et de l'air.....	32
IV.1.1.2	pH	34
IV.1.1.3	conductivité.....	35
IV.1.1.4	Salinité.....	36
IV.1.2	Variations saisonnières	37
IV.1.2.1	Température de l'eau et d'air.....	37
IV.1.2.2	pH.....	38
IV.1.2.3	Conductivité.....	39
IV.1.2.4	Salinité	40
IV.1.3	Variations spatiales.....	40
IV.1.3.1	Température de l'eau et d'air.....	41
IV.1.3.2	pH.....	42
IV.1.3.3	Conductivité.....	42
IV.1.3.4	Salinité.....	43
IV.2-	Teneurs en métaux lourds dans l'eau	43
IV.2.1.	Variations mensuelle	43
IV.2.1.1	fer	44
IV.2.1.2	cuivre.....	45
IV.2.1.3	nickel.....	46
IV.2.1.4	plomb.....	47
IV.2.1.5	zinc.....	48
IV.2.1.6	cadmium.....	49
IV.2.2	Variations saisonnières	51
IV.2.3	Variations spatiales.....	53
IV.3	Teneurs en métaux lourds dans les sédiments.....	55
IV.3.1	Analyses par spectrométrie de fluorescence X (FRX).....	55
IV.3.2	Teneurs des métaux lourds.....	55
IV.3.2.1	-Variations mensuelles.....	56
IV.3.2.1.1	fer.....	57
IV.3.2.1.2	cuivre	58
IV.3.2.1.3	zinc	59
IV.3.2.1.4	nickel	60
IV.3.2.1.5	plomb.....	61

IV.3.2.1.6 cadmium	62
IV.3.2.2 Variations saisonnières.....	64
IV.3.2.3 Variations Spatiales	66
IV.4 Calcul des indices.....	68
IV.4.1 Indice de géoaccumulation	68
IV.4.2 Facteur d'enrichissement	68
IV.4.3 Facteur et degrés de contamination	69
IV.4.4 Indice de charge de pollution (PLI).....	70
IV.4.5 Indice de risque écologique potentiel (PER).....	70
IV.5 Traitement statistique des données.....	71
IV.5.1 Analyse en Composantes Principales (ACP).....	71
IV.5.1.1 ACP dans les sédiments et les eaux de surface.....	71
IV.5.1.2 ACP paramètres physicochimiques	74
IV.5.2 Classification ascendante hiérarchique CAH.....	76
IV.5.2.1 CAH des sédiments et les eaux de surface.....	76
IV.5.2.2 CAH des paramètres physicochimiques.....	77
IV.6 Etudes comparatives.....	78
CONCLUSION	81
BIBLIOGRAPHIE	84
ANNEXE	93
ARTICLE	

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément précieux indispensable à la vie, cette ressource naturelle recouvre les trois quarts de notre planète, avec seulement 0,014% d'eau douce (Coble,1996).D'après des études récentes réalisées par l'organisation des nations unies (ONU), près de la moitié de la population des pays méditerranéens, se trouvera en situation de tension ou de pénurie d'eau en 2025 dû à la pollution de l'environnement aquatique par les substances toxiques d'origine anthropique, en particulier par les éléments traces métalliques(Cammack,2004).Ces polluants contaminent les systèmes aquatiques à partir de sources ponctuelles et diffuses (eaux de drainage, eaux usées, effluents industriels et agricoles) (Dahri et al., 2018).

Dans les systèmes aquatiques, les sédiments constituent un excellent réservoir de micropolluants puis une source potentielle de contamination pour les eaux (Tessier, 2012). Les métaux lourds ne sont pas biodégradables, à l'inverse des polluants organiques. Ils peuvent donc être transférés dans le réseau trophique et s'accumuler dans la matière vivante (Duquesne, 1992).

Plusieurs milliers de produits chimiques atteignent le milieu aquatique via l'atmosphère ou les eaux d'assainissement (Nakhle, 2003). Certains éléments métalliques, comme Cu, Zn, Co, Fe, Mn, Ni, Cr, V, Mo, Se, Sn, sont essentiels pour les organismes et sont appelés oligo-éléments (WHO, 2001).Leurs concentrations dans l'environnement peuvent aboutir à des phénomènes de toxicité. D'autres éléments comme le plomb, le mercure et le cadmium ne sont pas nécessaires pour les organismes et présentent des effets toxiques dès les faibles teneurs (de l'ordre du $\mu\text{g/l}$) (Sigg et al., 2001).

Les éléments traces métalliques (ETM) sont présents dans l'eau et les sédiments sous deux formes (Förstner et al.,1989 ; Di Palma et al., 2007; Banks et al., 2012) :

- dissoute dans l'eau et les sédiments, c'est la forme la plus mobile et donc la plus biodisponible pour les populations aquatiques.

- fixée sur les particules des sédiments ou en suspension dans l'eau. Sous cette dernière forme, les ETM peuvent s'accumuler dans le compartiment sédimentaire formant ainsi des stocks de polluants, potentiellement toxiques pour l'environnement. Ainsi, les zones sédimentaires possèdent des propriétés accumulatrices et constituent des compartiments sensibles dans lesquels on peut trouver les concentrations environnementales les plus importantes (**Devallois, 2009**).

Dans la région méditerranéenne, la pollution par les éléments traces métallique, s'est intensifiée au cours de ces dernières décennies (**Copat, 2012**), affectant la qualité de l'eau, des sédiments (**Palanques et al., 2008**) et les organismes marins (**Copat et al., 2012; Radakovitch et al., 2008; Ennouri et al., 2010; Roussiez et al., 2011; Kouidri et al., 2016; Reoyo-Prats et al., 2017; Inal et al., 2018, Benabdelkader, 2018, Belhadj, 2018 ; Abderrazzak,2021**).

En Algérie, le bassin versant de la Tafna est parmi le plus important bassin du pays avec une superficie agricole très importante. Oued Tafna, son principal cours d'eau, est considéré comme une source d'eau essentielle destinée principalement à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable. Les eaux usées issues de toutes les activités anthropiques de la région sont la plupart du temps rejetées dans l'oued Tafna sans aucun traitement préalable.

L'objectif de la présente étude est d'actualiser la base des données sur la contamination par quelques métaux lourds (Cd, Fe, Cu, Pb, Zn, Ni) dans les eaux et les sédiments de surface dans la partie aval du bassin de la Tafna.

Ce document s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique des généralités sur la présence les métaux lourds dans l'eau et les sédiments, sur les paramètres physicochimiques et un aperçu sur la phase sédimentaire.

Chapitre II présente la zone d'étude. Il illustre les différents paramètres du milieu physique sur plusieurs plans (géographie, géologie, climat, activités humaines) propres à cette zone.

Chapitre III décrit les différentes techniques de prélèvement, le protocole de minéralisation, l'analyse des métaux lourds par absorption atomique, les outils de traitement comme le calcul des indices et les méthodes de modélisation statistique.

Chapitre IV regroupe les résultats obtenus, argumentés par des discussions et des interprétations appuyés par les calculs d'indices et par des analyses statistiques.

Le document se termine par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

Un milieu aquatique est soumis à l'ensemble des interactions entre les trois compartiments de la biosphère (eau, sol, air). L'objectif de ce chapitre est de traiter plus particulièrement l'étude de la pollution par les métaux lourds de l'eau et des sédiments. La mise en œuvre de notre démarche nécessite une évaluation des connaissances de la littérature sur le sujet.

D'abord, les principales sources de cette pollution sont présentées ainsi que leurs impacts sur l'environnement. Ensuite, nous exposons les différents paramètres utilisés pour évaluer l'état de contamination de l'eau ainsi que, la caractérisation des sédiments qui sont considérés comme des pièges pour de nombreux polluants.

I.1/ Les éléments traces métalliques

Contrairement aux éléments majeurs (Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg, K, Ti, P, Mn, S et Ba) dont la concentration moyenne dans la croûte terrestre représente plus de 99%, les éléments traces sont des éléments dont la concentration est inférieure à 0,1% (**Baize, 1997**). Ces éléments ne représentent que 0,6% du total des éléments chimiques (**Alloway, 1997 ; Baize, 1997**), parmi ces éléments les métaux lourds, qui sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, retrouvés dans l'eau sous forme dissoute, particulière ou complexée, mais en général en quantités très faibles. Ils sont absorbés ou adsorbés par les sédiments ou transformés par les bactéries. Quant aux rôles biologiques au niveau de l'organisme, ils peuvent être classés en 2 groupes distincts:

- -les métaux essentiels ou oligo-éléments sont tous les métaux qui ont une utilité dans les processus biologiques et présentent un rôle biologique dans l'organisme, certains sont même indispensables à la vie (le fer, le cuivre, le zinc, le cobalt, le nickel, vanadium, le chrome, manganèse, molybdène, sélénium et étain). Ces éléments rentrent dans les réactions biochimiques de la matière vivante et ont ainsi un rôle nutritionnel (**Regoli et al., 1998**).
- -les métaux non-essentiels ou métaux toxiques sont sans intérêt biologique pour les organismes, ne rentrent pas dans les processus métaboliques, ils sont toxiques tels que le plomb, mercure, cadmium. Ils provoquent une désorganisation au niveau cellulaire, car ils exercent souvent leur nocivité par l'inhibition du système enzymatique (**Viala, 1998**).

I.1.1 Origine des éléments traces métalliques

Origine des éléments traces métalliques dans l'environnement aquatique, les ETM sont d'origine naturelle sont naturellement présents dans les roches et la croûte terrestre en faibles concentrations (Tableau I.1). Les principales sources anthropiques sont la métallurgie et la fonderie, l'incinération des déchets, la combustion des matériaux fossiles et des carburants et l'épandage de produits phytosanitaires et de fertilisants en agriculture (Tableau I.2).

Tableau I.1 : Concentration ($\mu\text{g/g}$) de quelques ETM dans la croûte terrestre (**Alloway et Ayres, 1997**)

Métaux lourds	Croûte terrestre ($\mu\text{g/g}$)
Cd	0,1
Co	20
Cu	50
Mn	950
Ni	80
Pb	14
Zn	75

A partir de leurs points d'émission, les ETM vont emprunter différentes voies de dispersion pour se retrouver dans le milieu aquatique. Les cheminements pris par les ETM dépendent de leur mode d'introduction (rejets directs dans les rivières, dans l'atmosphère ou sur le sol) ainsi que de leur forme physique (solide, liquide ou gazeuse) (**Foster et Charlesworth, 1996**). L'atmosphère constitue un milieu clé pour le transfert des polluants métalliques vers le milieu aquatique. Ainsi, à l'échelle globale de la Terre, cette voie fournit plus de 70% du plomb et du vanadium total, environ 30 % de mercure total et 20% de cadmium total au milieu aquatique. Dans les régions rurales, l'atmosphère fournit la majeure partie des stocks d'ETM dans le milieu aquatique.

Tableau I.2: Sources principales des contaminants métalliques [d'après Adriano, 2001), Boucheseiche et al., 2002 et Meybeck et al., 2007]

ELEMENT METALLIQUE	ORIGINE ANTROPHIQUES
Arsenic (As)	Métallurgie, tannerie, coloration des verres et céramiques, pesticides, protection du bois, combustibles fossiles
Cadmium (Cd)	Métallurgie, traitement de surface, céramique, colorants, usure des pneumatiques, incinération des déchets, engrais phosphatés
Cuivre (Cu)	Métallurgie, électricité, photographie, traitement de surface, pigments, industrie textile, fongicide
Chrome (Cr)	Fabrication de l'acier, traitement de surface, industrie textile, céramique, verrerie, photographie, cimenterie
Cobalt (Co)	Métallurgie, batteries, peinture, catalyseurs
Mercure (Hg)	Piles, batteries, tubes fluorescents, industrie chimique du chlore, combustibles fossiles, incinération des déchets
Nickel (Ni)	Fabrication d'acier et d'alliages, dépôts chimiques et électrolytiques
Zinc (Zn)	Galvanisation, imprimerie, teintures et pigments, insecticides, usure des pneumatiques, bâtiments et toitures

I.1.2 Cycle des éléments traces métalliques dans l'environnement aquatique

Dans l'environnement aquatique, il existe quatre réservoirs d'ETM qui interagissent (Figure I.1) : Les matières en suspension (MES), la colonne d'eau elle-même, les sédiments et les eaux Interstitielles (**Salomons et Förstner, 1984**). De très nombreux mécanismes (adsorption/désorption, (co-précipitation/dissolution...) interviennent entre les MES et les ETM dissous en solution (1). Les échanges entre MES et sédiments interviennent lors des

processus de sédimentation et érosion/re suspension (2). Puis des échanges de métaux se produisent entre les différentes fractions du sédiment et les eaux interstitielles (3) qui se retrouveront à nouveau dans les eaux de surface (4) à travers des mécanismes de diffusion par exemple (figure I.1)

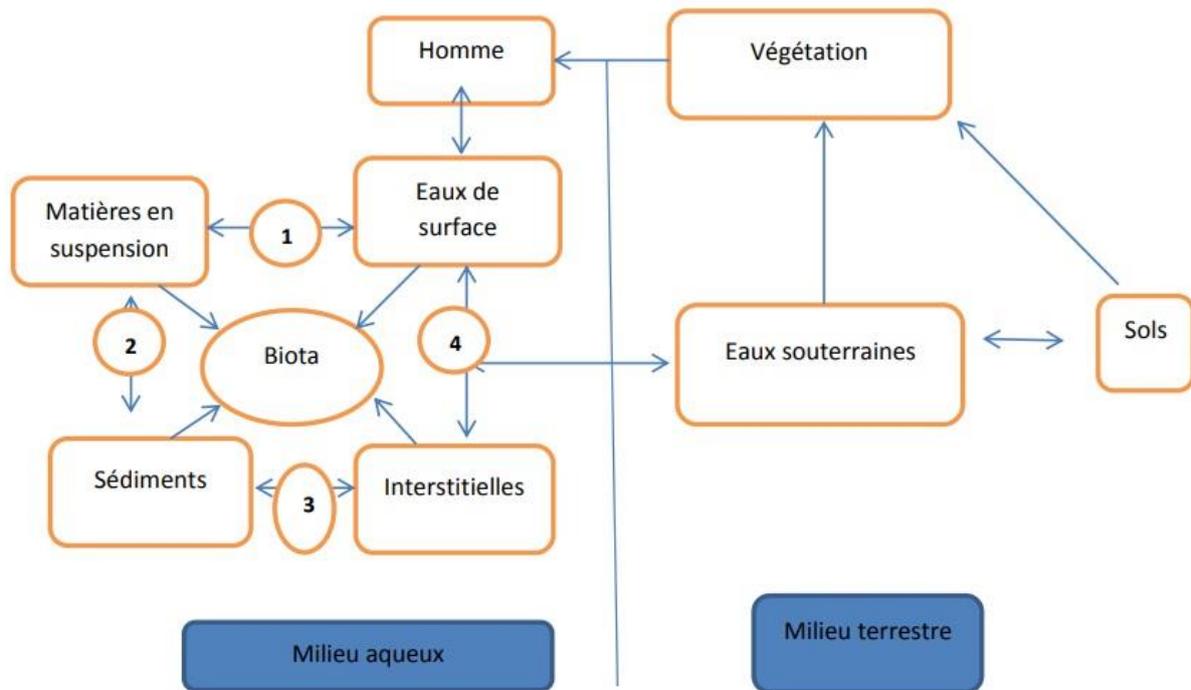


Figure I.1: Schématisation du cycle hydrologique des métaux traces en milieu aqueux (d'après **Salomons et Förstner, 1984**)

Les échanges entre les sédiments et l'eau sont particulièrement importants. Concrètement, les ETM des sédiments et des eaux interstitielles peuvent se retrouver en solution sous forme particulaire ou dissoute lors des opérations de dragage qui entraînent un brassage des sédiments et modifient les paramètres physico-chimiques du milieu dont les conditions d'oxydo-réduction et le pH (**Eggleton et Thomas, 2004**).

I.1.3 Toxicologie des métaux lourds

Quand ils ne contaminent pas les eaux souterraines par lessivage, les éléments traces métalliques, non dégradables dans le sol, s'y accumulent puis pénètrent dans les plantes que les animaux consomment ensuite, l'homme y compris. On estime ainsi que les végétaux récoltés stockent environ 1 % des métaux présents dans l'horizon de surface (**Baise, 1997**). Pour l'homme, l'inhalation de poussières et d'aérosols reste la principale source d'intoxication, mais les risques liés à l'absorption de métaux lourds par ingestion d'eau ou de

nourriture ne sont toutefois pas négligeables. Des exemples historiques montrent qu'une contamination accidentelle massive par ingestion peut avoir des conséquences dramatiques à l'échelle de toute une population. C'est ce qui s'est produit lors de la catastrophe, au Japon, dans les années 50 (**Miquel, 2001**).

Il existe une troisième voie d'introduction des polluants dans l'organisme, la voie dermique, qui intervient en cas de contact direct avec les substances. Cependant, quel que soit le mode de contamination, les éléments s'accumulent dans l'organisme (sang, foie, cerveau, reins...) et ne sont éliminés que très lentement. Le tableau 1.2 montre, par ordre croissant, la demi-vie biologique des métaux (**Bliefert et Perraud, 2001**), au bout de la quelle l'organisme a éliminé la moitié de la quantité absorbée. On note que certains éléments (plomb, mercure, cadmium) ont des demi-vies biologiques très différentes selon leur cible dans l'organisme. De la même façon que le comportement des éléments traces dans l'environnement dépend de leur forme chimique, il faut souligner que leur toxicité varie énormément en fonction de leur spéciation (**Benhaddya, 2014**).

Tableau I.3 : Temps de demi-vie biologique de quelques éléments (**Bliefert et Perraud., 2001;Ineris, 2003**)

Élément	Temps de demi-vie biologique
Mo	5 jours
Cu	13-33 jours
Mn	15-20 jours
Pb	20-30 jours dans le sang 40-60 jours dans les reins, la moelle, le foie, le cerveau (2-10 ans dans les os)
Hg	30-60 jours (1 an dans le cerveau)
Cr	1-2 ans
Co	2-15 ans
Zn	2-3 ans
Cd	30 jours dans le sang 20-30 ans dans le rein

I.2 La pollution des eaux de surface

L'eau est l'une des ressources la plus abondante sur la terre, mais il faut signaler également que seulement moins de 1% de cette ressource sont utilisables de façon fiable pour les besoins humains. L'eau se présente en majeure partie à l'état liquide mais elle est présente aussi à l'état solide et à l'état de vapeur (**Pnue, 1991**). Donc l'eau douce disponible est une forme rare de l'eau, car 99 % de la masse totale de l'eau est soit salée (97% de l'eau est contenue dans les océans), soit à l'état solide (2% dans les calottes glaciaires et les glaciers). La majeure partie de l'eau restante (1%) est souterraine, une proportion infime étant présente dans les lacs, l'humidité du sol, les cours d'eau et les systèmes biologiques.

La pollution d'une eau superficielle est la dégradation de sa qualité en modifiant ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Les effets indésirables de ce phénomène sur les organismes vivants ont fait l'objet de nombreux travaux (**Adjagodo, 2017**).

Les causes et les mécanismes de la pollution sont multiples (**Boutin, 1987**), elles sont d'origine domestiques lorsqu'elles proviennent des habitations sont véhiculées par les réseaux d'assainissement, elles sont d'origine industriels lorsqu'elles proviennent des rejets industriels liés à l'utilisation de fortes concentrations de produits chimiques toxiques et elle est d'origine agricole lorsqu'elles proviennent des fermes et se caractérise par de fortes teneurs en sels minéraux et en produits phytosanitaires.

Cependant l'agriculteur est le premier responsable de la majeure partie de la pollution des eaux souterraines notamment à cause de l'utilisation intensive des engrais, des pesticides et d'autres produits phytosanitaires (**BRGM, 2003; Derwich, 2008; El Assludj, 2007**).

I.2.1 Les différents types de pollutions

I.2.1.1 La pollution chimique

La pollution chimique peut être définie comme étant le résultat de la présence d'un ou plusieurs éléments chimiques indésirable ou inexistante dans la composition chimique de l'eau naturelle. Plusieurs paramètres peuvent évaluer cette pollution. On distingue le pH, la conductivité la turbidité, la demande chimique en oxygène qui sont classés comme paramètres globaux résultant de la combinaison des effets de plusieurs substances en même temps. D'autres paramètres spécifiques qui caractérisent un composé particulier ou plusieurs de propriétés chimiques semblables peuvent définir une pollution chimique (**Djedjai, 2014**).

I.2.1.2 La pollution physique

Elle résulte de différents éléments solides entraînés par les rejets domestiques et industriels.

On distingue :

- **Pollution solide** : elle provient des particules solides apportées par les eaux industrielles ainsi que les eaux de ruissellement et issue des décharges de déchets à ciel ouvert.
- **Pollution thermique** : causée généralement par les eaux des circuits de refroidissement des usines, en effet tout changement de température de l'eau a des conséquences significatives sur l'équilibre écologique du milieu aquatique naturel et la survie des organismes vivants.
- **Pollution radioactive** : liée aux rejets des éléments radioactifs par les installations et les centrales nucléaires ainsi que les usines de traitement de déchets radioactifs (**Kalle, 1963**).

I.2.1.3 La pollution microbiologique

Elle provient de plusieurs sources comme les rejets des hôpitaux, l'agriculture ainsi que les rejets d'eaux usées. L'eau se charge de microorganismes pathogènes (bactéries, virus, parasites) qui peuvent être dangereux pour l'environnement et pour la santé humaine (**Lounnas, 2009**).

I.2.2 Evaluation de la qualité des eaux de surface

I.2.2.1 Température :

C'est une caractéristique physique importante, elle joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique (**De Villers et al., 2005**). La température de l'eau dépend essentiellement de la température de l'air, cependant d'autres facteurs locaux peuvent l'influencer, par exemple les facteurs morphologiques (la pente), l'ombrage de la végétation riveraine et l'alimentation par les eaux souterraines.

I.2.2.2 pH

C'est un paramètre qui permet la mesure de la concentration des protons H^+ dans un milieu aqueux en déduisant sa nature (acide, basique ou neutre) (**Nehme, 2014**). Ce paramètre joue un rôle très important dans le développement de la vie aquatique. De plus, le pH influe sur le comportement de certains éléments comme les métaux dont il peut diminuer ou augmenter la mise en solution et donc la toxicité en rendant les métaux biodisponibles. Généralement, les valeurs de pH des eaux naturelles sont comprises entre 6 et 8,5 (**Derwich, 2008**).

I.2.2.3 Conductivité électrique (CE)

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats de mesure doivent donc être présentés en termes de conductivité équivalente à 20 ou 25°C. Comme la température, des contrastes de la conductivité permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélanges ou d'infiltration.

I.2.2.4 Salinité

La salinité est un facteur écologique constitué par la teneur en sel (NaCl) des eaux.

Ces derniers sont parmi les principaux constituants d'une cour d'eau c'est à dire ceux qui se trouvent particulièrement abondants.

La salinité est une mesure biologique importante, car le sel se dissout dans les liquides organiques de tous les êtres vivants. Le taux de sels dissous dans un fluide contrôle le processus biochimique de l'osmose ainsi que de nombreux processus métaboliques (**Barnabé, 1991**).

I.2.3 ETM dans l'eau

Au sein du compartiment aquatique, les ETM sont retrouvés aussi bien dans les eaux de surface que dans les eaux profondes (**Ribera et al., 1996**). Dans les zones estuariennes, les ETM sont naturellement présents à des teneurs très variables dans la colonne d'eau s'étalant de quelques ng/l (mercure) à 2 mg/l (fer) selon les concentrations de l'élément dans les sols environnants (**WHO, 2001 ; Denison, 2004**). Cependant, la proximité d'une zone impactée par l'activité humaine peut influencer sur ces concentrations naturelles. Il peut en résulter une élévation localement importante pouvant aller jusqu'à 20 mg/l (**Ragnarsdottir et Charlet, 2000**).

I.3 Les sédiments

Le sédiment est un compartiment complexe et relativement hétérogène formé d'eau, de matériaux détritiques, de composés minéraux et organiques (**Power et Chapman, 2018**). Sa composition est partiellement liée à la minéralogie des bassins versants et à la structure du couvert végétal régional. L'origine des dépôts constituant le sédiment peut être allochtone suite à l'érosion provoquée par des forçages externes (eau, vent...) et/ou autochtone suite à la

précipitation de composés minéraux (carbonates, évaporites...) et organiques (fragment de végétaux supérieurs, organismes planctoniques morts...) (**Ramade, 1997**). Les différentes activités anthropiques peuvent induire, en outre, d'importantes modifications dans la composition du sédiment, essentiellement pour les éléments présents à l'état de traces.

Globalement, un sédiment présente une composition chimique relativement hétérogène dont les caractéristiques principales sont régies par la présence d'éléments majeurs : le calcium dans les carbonates, le silicium dans l'opale (boue à base de diatomées, par exemple), l'aluminium (accompagné de Mg, Ti, K, Na) dans les aluminosilicates et le fer et manganèse dans les sédiments à nodules polymétalliques.

I.3.1 Granulométrie

Les sédiments sont classés en fonction de la taille de leurs particules. La classification la plus connue et la plus utilisée est celle de **Bellair et al., (1977)** établie comme suit :

- les sédiments grossiers principalement constitués de sable et de matériel inorganique silicaté caractérisés par des particules de diamètre supérieur à 63 μm . Ces sédiments qualifiés de terrigène, c'est-à-dire issus de l'érosion, sont caractérisés par une faible cohésion et une surface de contact des différentes particules faible. Ils sont donc peu associés aux contaminants et sont généralement composés de graviers (diamètre supérieur à 2 mm) et de sables (diamètre compris entre 63 μm et 2 mm).
- les sédiments fins constitués de minéraux argileux ayant un diamètre compris entre 0,2 et 2 μm et de silt avec un diamètre compris entre 2 μm et 63 μm . Ces sédiments qui peuvent également contenir de la matière organique sont caractérisés par des particules fines très cohésives et chargées négativement avec une surface de contact importante. Ces caractéristiques leur confèrent un grand pouvoir adsorbant vis à vis des contaminants métalliques.

I.3.2 Composition des sédiments

Le sédiment sont composés principalement de :

- **Eau interstitielle:** correspond à l'eau qui occupe l'espace entre les particules sédimentaires et représente une fraction importante du sédiment (**Forstner, 1986**)
- **Phase inorganique :** Elle est formée de minéraux provenant de l'érosion de l'écorce terrestre et de débris coquilliers. Composée principalement d'argiles, de carbonates et de silicates.
- **Phase organique :** Elle n'occupe qu'un faible volume du sédiment (quelques %) et régule la biodisponibilité d'un grand nombre de contaminants.

I.3.3 La texture des sédiments

La taille des particules des sédiments ou des matières en suspension est l'un des paramètres qui contrôle la répartition et distribution des éléments traces (**Förstner et al., 1982**). Plus la dimension des particules est petite plus la surface spécifique des particules (rapport surface/volume) est importante et plus la concentration des éléments traces est élevée (**Salomons, 1984 ; Martincic, 1990**). La teneur la plus importante en éléments traces a été observée par plusieurs auteurs dans la fraction $<63\mu\text{m}$. Les fractions fines dominées par les minéraux argileux facilitent l'adsorption des éléments traces et peuvent le faire en combinaison avec les oxydes d'Al, Fe, les oxydes amorphes de Mn et des matières organiques (dont certaines peuvent recouvrir la surface des argiles) (**Li et al., 2009**).

I.3.4 ETM dans les sédiments

La forte solubilité de certains contaminants métalliques dans (**Cowart et Burnett, 1994**), les sédiments accumulent les concentrations les plus élevées dans les écosystèmes (**Hynes, 1990**). Cette faculté des sédiments à fixer de grandes quantités de métaux confère donc à ce compartiment du biotope un rôle de stockage significatif avec une possibilité de relargage dans la colonne d'eau (**Woods, 2009**). Le compartiment sédimentaire n'est pas donc isolé du reste de l'écosystème et l'on peut s'interroger sur le rôle des sédiments pollués qui pourraient se comporter comme une source de contaminants pour le milieu aquatique par diffusion des métaux sédimentaires vers la colonne d'eau. Ce rôle de puits (**Spencer et MacLeod, 2002**) et de source de contamination fait que ce compartiment occupe une place de choix dans l'étude des ETM dans les hydrosphères.

Chapitre II

PRESENTATION DES

SITES D'ETUDE

II.1. Présentation du bassin versant de la Tafna

Le bassin de la Tafna surnommé "le château d'eau de l'Ouest Algérien" est considéré comme l'un des bassins les plus importants dans le territoire algérien. C'est un pourvoyeur important de ressources hydriques pour la région Ouest, il alimente non seulement les régions du bassin versant mais aussi d'autres régions par le biais d'aménagement comme le transport inter bassin (Mami et Yebdri, 2015).

Le bassin versant de la Tafna subvenait aux besoins en eau pour les diverses utilisations de plus de 2 millions de personnes. Ce bassin, doté de 5 barrages d'une capacité globale de 385 Hm³, et cumule depuis le milieu des années soixante-dix un déficit pluviométrique estimé à environ 25 %. Cette diminution de la pluviosité a engendré une baisse sans cesse croissante des ressources en eau superficielles et souterraines de la région en question (Ghenim et Megnounif, 2013).



Figure II.1: Bassin versant de la Tafna prise pendant l'échantillonnage
(Estuaire, Siga) (Originale)

II.1.1 Position géographique

Le bassin versant de la Tafna situé au nord-ouest du territoire algérien. La superficie de la partie de ce bassin se trouvant dans le territoire algérien est de 5340 km². Y compris la surface située à l'intérieur du territoire marocain (1905 km²), donc la superficie totale est de 7245 km²

Chapitre II : PRESENTATION DES SITES D'ETUDE

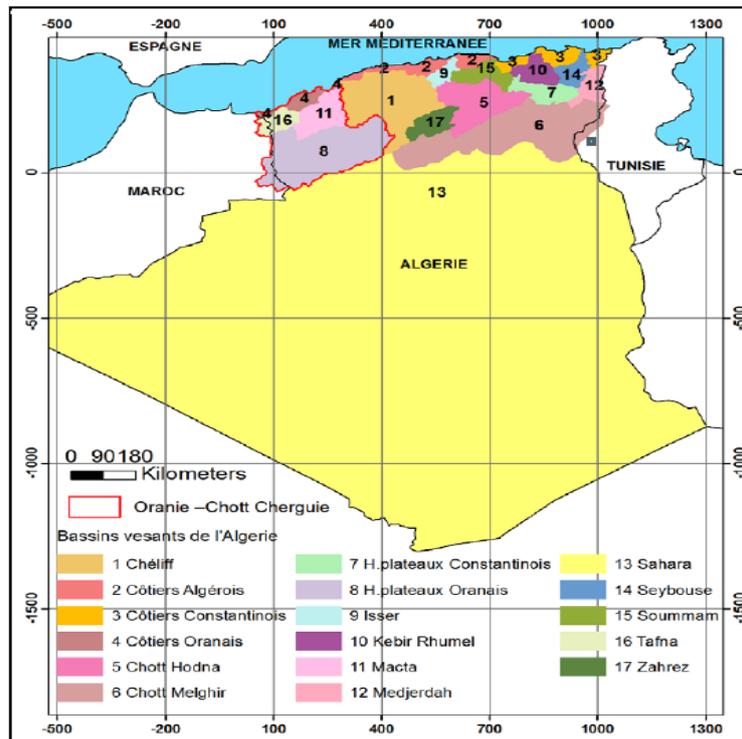


Figure II.2: La Tafna parmi les bassins de l'Algérie

Il figure parmi les bassins de l'Oranie-Chott-Chergui et s'étend entre la latitude 34°47' et 35°10' et la longitude 2°14' Ouest et 0°50' Est. Il porte le code 16 parmi les 17 bassins de l'Algérie (Bemoussat, 2012 et Bakreti, 2014).

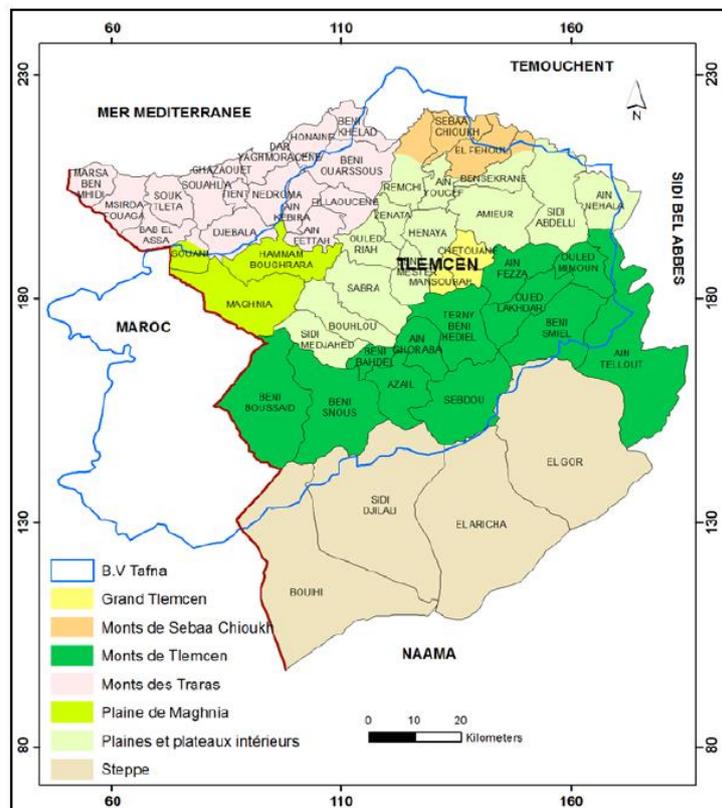


Figure II.3: Cadre géographique de bassin versant de la TAFNA

II.1.2 Délimitation du bassin

Le bassin versant de la Tafna est délimité comme suit:

- Nord-ouest : les communes Bab el Assa, Djebala, Nedroma, Beni Khaled et honaine.
- Nord : la mer Méditerranée.
- Nord-est : Wilaya Ain Témouchent.
- Sud : les 4 communes steppiques (Bouihi, El Gor , sidi Djilali, El Aricha).
- Ouest : Le Maroc.
- Est : Willaya de Sidi Bel Abbes, commune d'Ain Tellout.

II.1.3 Les sous-bassins

Le bassin de la Tafna est constitué de huit (08) sous bassins (Figure II.4), dont deux se trouvent en amont dans le territoire marocain englobant une superficie de 1950 km², soit 27 % de la superficie totale du bassin versant :

- Sous bassin de oued Isser (Bensekrane).
- Sous bassin de oued Isser (Remchi).
- Sous bassin de oued Lakhdar (Chouly).
- Sous bassin de oued Sikkak.
- Sous bassin de oued Enachef.
- Sous bassin de oued Ouardefou.
- Sous bassin de oued Boukiou.
- Sous bassin d'oued Mouillah.

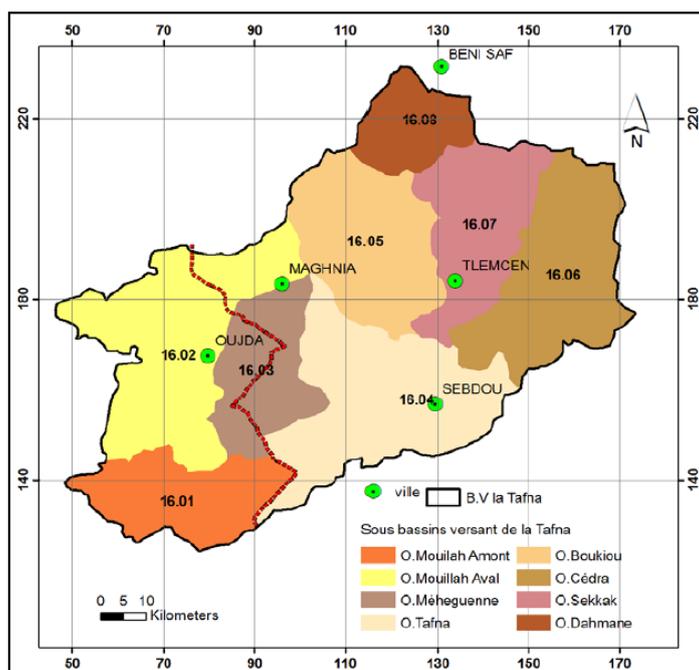


Figure II.4: les sous bassins versant de la Tafna

II.1.4 Hydrographie

Le réseau hydrographique de la Tafna est constitué par un ensemble important d'oued et de chaâbat qui déversent tous dans l'oued Tafna (Figure II.5) soit directement ou par intermédiaire de l'un de ses affluents. Les plus importants sont les oueds Isser, Mouillah, Sikkak, Boumassaoud, Khemis, Boukiou, Dahmane et Chiha.

Loued Tafna mesure 170 Km long et subdivisé en trois parties :

- ✓ La haute Tafna : L'oued prend naissance dans ouriach jusqu'à Sidi Medjahed.
- ✓ La moyenne Tafna : à partir de Sidi Mejahed jusqu'aux gorges de Tahouart vers le village de pierre du chat.
- ✓ La basse Tafna : à partir des gorges de Tahouart jusqu'à l'estuaire de la Tafna.

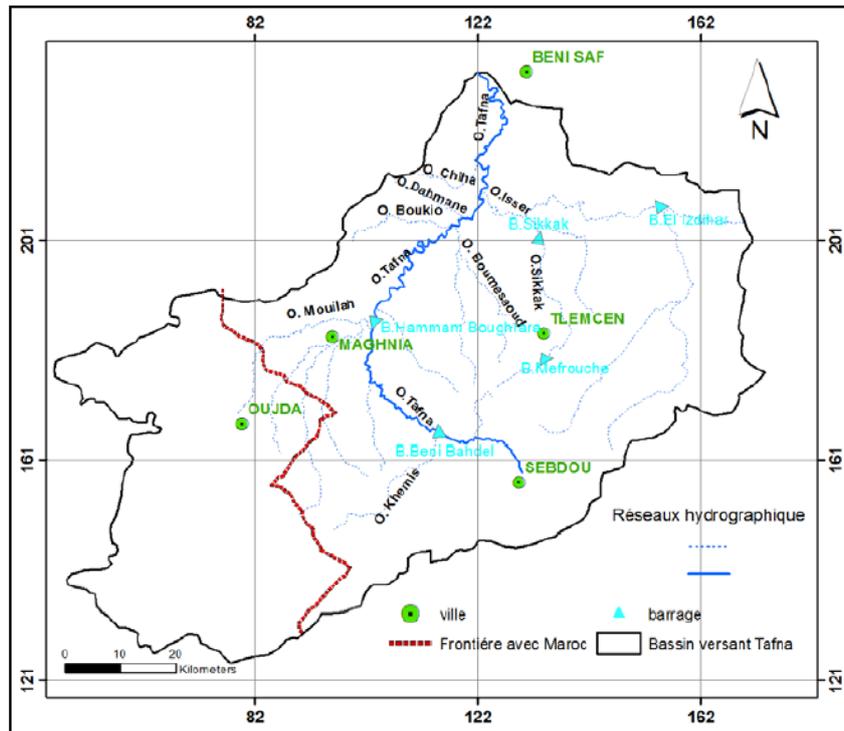


Figure II.5: Réseau hydrographique

II.1.5 Climatologie

La latitude, la proximité de la mer, l'orographie, la nature du sol, la végétation et l'état moyen de l'atmosphère sont les principaux éléments qui influent sur le climat d'une région.

La région de Tlemcen est sous l'influence du climat méditerranéen qui dépend des courants atmosphériques alimentés par le déplacement de l'anticyclone des Açores, ce qui engendre une période froide et humide de courte durée, en hiver et au début printemps, et une période chaude et sèche de longue durée, l'été et l'automne.

Du point de vue bioclimatique l'étage sub-humide comprend les monts de Tlemcen, alors que vers le nord la tendance varie du semi-aride à l'aride, d'où une forte évaporation des cours d'eau dans le bassin aval allant jusqu'à leur assèchement en été.

II.1.6 Occupation des sols

La végétation naturelle représentée par des forêts et maquis recouvre environ 40% de la surface totale du bassin versant et est étroitement liée à la pluviométrie. En amont du bassin à 1200m d'altitude, les sols sont occupés par une forêt de Chêne vert et de Pin d'Alep au-dessous de 1200m, la zone est caractérisée par la présence d'Oxycèdre, quelques vestiges de Chêne vert, de Palmier nain et de Tuya. Les terrasses et le fond des vallées de l'oued Tafna sont occupés par des terrains cultivés et les pentes sont couvertes de garrigues.

Dans la partie moyenne et basse du bassin, la végétation ligneuse est remplacée par les cultures céréalières, fruitières et surtout maraîchères. La végétation naturelle subsistante, comprenant le Tamarix et le Laurier, n'est représentée que par des taches peu étendues. L'agriculture occupe une place importante dans la Tafna avec les principales cultures : la céréaliculture (170000ha), l'arboriculture (26280 ha) et des cultures maraîchères (7695 ha) (Ministère de l'agriculture algérien, 2011) (Taleb, 2004 ; Zettam, 2018).

II.1.7 Les activités anthropiques dans le bassin versant

II.1.7.1 Activités agricoles

L'activité agricole dans le bassin de la Tafna est très diversifiée, car elle joue un rôle économique important pour la région. Les cultures extensives, basées surtout en moyenne et basse Tafna, rassemblent toutes les cultures annuelles telles que les céréalicultures, les cultures maraîchères et l'association entre l'arboriculture et le maraîchage. L'arboriculture est représentée principalement par les vignobles, l'olivieraie, les agrumes, vergers et murs en

quantité inférieure. L'utilisation des fertilisants et pesticides (annexe 1) est de plus en plus intense, ce qui augmente l'exposition du bassin à la contamination (**Benabdelkader et al., 2018**).

II.1.7.2 Activité Industrielles

Pour s'adapter à une croissance démographique très importante ces dernières années, le bassin versant de la Tafna est exposé à une intensité industrielle très forte et diversifiée. La présence de 6 sites industriels et semi-industriels majeurs dans les régions de Sebou, Tlemcen, Maghnia et Oujda, peut avoir un impact sur la qualité de l'eau le long de la rivière. Le Tableau V résume quelques industries importantes présentes dans le bassin versant de la Tafna ainsi que leurs activités, la qualité des rejets, la concentration des métaux analysés dans les rejets et le milieu récepteur.

Chapitre II : PRESENTATION DES SITES D'ETUDE

Tableau II.1: Inventaire de quelques unités industrielles (Ministère de l'Energie et des Mines d'Algérie, 2019). (-) : pas de données ; * : Source : Inspection de l'environnement de Tlemcen (2019)

Industries	Activités	Quantité des rejets	*Métaux dans les eaux des rejets (mg.l ⁻¹)	Milieu récepteur
ENOF	-Bentonite de fonderie - Terre décolorante -Charge industrielle calcite	600 m ³ .jour ⁻¹	Zn=1,06 Cd=0,01 Fe=74,7 Pb=0,51 Cu=0,12 Al=354 Mn=3,99	Oued Ouerdeffou
ENCG	-Raffinerie de l'huile alimentaire -Savonnerie et glyconnerie	528 m ³ .jour ⁻¹	Zn=0,15 Cd= - Fe=0,93 Pb=0,60 Cu=0,03 Al=2,30 Mn=0,16	Oued El Abbes
ERIAD	Production de : -Glucose -Amidon -Sirop -Dextrine -Fourrage Gluten	500 m ³ .jour ⁻¹	Zn=0,87 Cd=0,01 Fe=0,83 Pb=0,68 Cu=0,087 Al=4,80 Mn=0,17	Oued El Abbes
CERTAF	Fabrication de : -Céramique -Porcelaine -Vaisselle - Faïence	130 m ³ .jour ⁻¹	Zn=0,89 Cd=0,06 Fe=3,23 Pb=19,50 Cu=0,06 Al=36,6 Mn=18,50	Oued El Abbes
CERAMIR	-Céramique	-	-	Aval de l'Oued Isser

Chapitre III

MATERIEL ET METHODES

III.1.Echantillonnage :

III.1.1/ Choix des points de prélèvement

Dans ce travail, le choix des points de prélèvement a été basé sur la faisabilité technique de la collecte de l'eau et des sédiments, la contamination potentielle du milieu observée à partir de déchets ménagers et/ou des rejets industriels et domestiques ainsi que sur les fortes activités agricole. Les échantillons ont été prélevés dans cinq stations de l'aval du bassin versant de la Tafna, à partir de Remchi jusqu'à l'estuaire de Tafna à Rachgoun : Isser, Pierre du chat, Amir; Siga et l'estuaire Tafna.

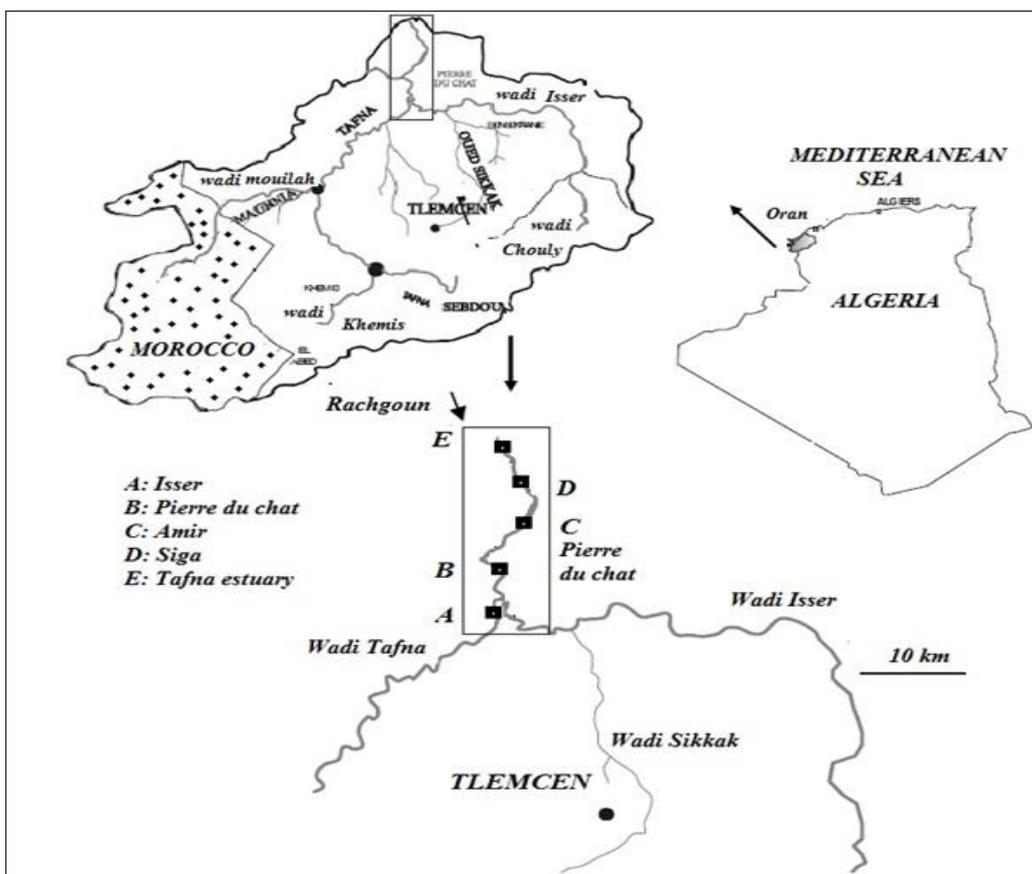


Figure III.1: Les points de prélèvements (Dali-Youcef, 2005)

III.1.2. Choix des échantillons et contaminants

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à deux compartiments du bassin versant à savoir les eaux et les sédiments superficiels. Ces derniers représentent d'excellents réservoirs ou puits de polluants chimiques, en particulier les métaux lourds (**Förstner et Wittmann, 1981; Boucheseiche et al., 2002, Dali youcef, 2005, Derrag, 2014**). Le choix des métaux lourds étudiés est basé sur leur probable présence sur le site d'après divers travaux réalisés sur le site (**Dali youcef, 2005 ; Dali youcef, 2006 ; Benabdelkader, 2018**) ainsi les possibilités d'analyses permises au laboratoire de l'usine d'ALZINC à Ghazaouet, au sein duquel nous avons effectués nos différents dosages par un spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA). En considérant ces paramètres, six métaux ont été retenus pour notre étude à savoir le fer, le cuivre, le zinc, le nickel, le plomb et le cadmium.

III.1.3 Prélèvement :

Les prélèvements d'échantillons ont été effectués chaque mois pendant une année au niveau de nos cinq points de prélèvement durant la période allant du mois de décembre 2012 au mois novembre 2013.

III.1.3.1 Prélèvement d'eau

Les échantillons d'eau de surface ont été recueillis près du bord, dans des bouteilles en plastiques de 1,5 litres étiquetées et préalablement rincées trois fois à l'eau du site avant d'être remplis complètement.

III.1.3.2 Prélèvement des sédiments

Les sédiments superficiels (cinq premiers centimètres) ont été prélevés par raclage à l'aide d'une petite pelle, Ils sont ensuite introduits dans des sacs en plastique étiquetés et transportés au laboratoire dans des conditions ambiantes.

III.2 Traitement des échantillons et technique d'analyse :

III.2.1 L'eau :

Pour les échantillons d'eau, des paramètres physico-chimiques ont été mesurés mensuellement directement sur le terrain la température d'eau, la température d'air, pH et la conductivité électrique. Afin d'éviter toute modification significative de ces paramètres due aux échanges éventuelles que pourraient avoir les échantillons avec l'extérieur, ces mesures ont été faites aussitôt à l'aide d'un appareil multi paramètre de type HACH 340i SET, les échantillons a subi au préalable un nettoyage. L'équipement a été rincé à l'eau bi-distillée.

Le plus grand soin a été donné au maintien des conditions de propreté pendant la collecte et la

manipulation des échantillons, dans le but de minimiser les possibilités de contamination des échantillons (**Guéguen, 2001**). Après filtrations d'eau, deux à trois gouttes d'acide nitrique pur ont été ajoutées aux échantillons destinés à la mesure des métaux par SAAF (spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme). Cette acidification limite l'adsorption des métaux sur les parois et la matière organique et évite les précipitations, ainsi empêche le développement de microorganismes qui pourraient capter les métaux.

III.2.2 Les sédiments :

III.2.2.1 Séchage, broyage et tamisage

Les sédiments ont été séchés à la température ambiante pendant plusieurs jours, broyés l'aide d'un mortier en porcelaine, puis tamisés ($< 63 \mu\text{m}$). Ces derniers ont été conservés dans des boîtes de pétri fermées et étiquetées, à basse température jusqu'à la minéralisation.

La fraction fine inférieure à $63 \mu\text{m}$ a été retenue, car elle est considérée dans la littérature comme la plus réactive vis-à-vis des métaux qui s'associent le plus à cette fraction (**Dassenakis et al., 2003**). Ainsi, de très nombreuses études ont été faites sur cette fraction (**Quevauviller et al., 1997 ; Morillo et al., 2004**). De plus (**Ongley et al., 1982 et Lick, 1982**) ont montré son importance du point de vue géochimique.

III.2.2.2 Minéralisation

Les sédiments de surface ont subi deux attaques totales détruisant la matière organique pour déterminer les concentrations totales des métaux lourds. La technique de digestion acide envisagée a été développée à partir de la littérature (**Loring et Rantala, 1992; Dali youcef 2005; Derrag 2014; Belhadj, 2018**).

Dans un tube, on pèse 0.3g de sédiment sec ($<63\mu\text{m}$) a été ajouté, sous une hotte 3 ml d'acide chlorhydrique et 1 ml d'acide nitrique. Le mélange a été chauffé dans un minéralisateur à cent degré Celsius environ pendant huit heures. Le chauffage se poursuit jusqu'à disparition totale des vapeurs nitreuses rousses et apparition d'un résidu noire. Ensuite nous avons évaporé l'échantillon à sec. Après refroidissement nous avons introduit l'eau bi-distillée puis agité afin de solubiliser les métaux puis de nouveau nous avons évaporé l'excès d'acide comme précédemment. Enfin, nous avons introduit 25ml d bi-distillée d'eau bi-distillée puis nous avons filtrées utilisant le papier filtre de $0,45\mu\text{m}$ puis conserve a 4°C jusqu'à l'analyse par un spectrophotomètre d'absorption atomique SAAF. Pour chaque point de prélèvement, trois digestions on été réalisées

III.2.2.3 Dosage des métaux lourds

Le dosage de nos échantillons a été réalisé au niveau du laboratoire de contrôle de qualité à l'usine d'électrolyse de zinc ALZINC(Ghazaouet). L'appareil utilisé est un spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme de type (AURORA AI.1200) (Figure III.2).

Une solution contenant l'élément métallique à doser est injectée dans une flamme dans laquelle les éléments tendent à rester à l'état fondamental. Une radiation de longueur d'onde caractéristique de l'élément à doser provenant d'une lampe à cathode creuse est émise à travers la flamme. En absorbant cette énergie, les atomes passent à l'état excité. La baisse de l'intensité de la radiation due à l'absorption d'énergie est mesurée par un spectrophotomètre, et elle est fonction du nombre d'atomes présents sur le chemin de la radiation à tout moment (Delval, 1984). L'absorbance est proportionnelle au coefficient d'absorption spécifique ϵ , au trajet optique L et à la concentration C.



Figure III.2 : Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme (SAAF) de type AURORA AI.1200

$$A = \epsilon \cdot L \cdot C$$

A : l'absorbance.

L : trajet optique.

ϵ : coefficient d'absorption spécifique.

C : la concentration.

Cependant en pratique, cette relation n'est pas toujours vérifiée. On n'obtient pas toujours une droite d'étalonnage. C'est le cas si la concentration devient trop élevée. La gamme de dosage est le domaine dans lequel la droite d'étalonnage est pratiquement une droite. Il est limité pour les faibles concentrations par la limite de détection et pour les fortes concentrations par l'erreur sur la fidélité : à une très forte variation de la concentration correspond une faible variation de l'absorbance. La gamme de dosage est généralement donnée par le constructeur. Elle dépend de la raie de dosage utilisée (**Daniel, 2009**).

Les raies d'émission et les limites de détection de l'appareil AURORA AI.1200 sont regroupées sur le Tableau III-1.

Tableau III-1: Les longueurs d'ondes des différents métaux

Eléments	Raie principale (nm)
Fer	248,3
Cuivre	324,7
Zinc	213,9
Plomb	283,3
Cadmium	228,8
Nickel	232

La concentration du métal dans l'échantillon est calculée selon la formule :

$$C = \frac{C_1 \times V}{P}$$

C : Concentration du métal de l'échantillon en mg/kg.

C₁ : Concentration de la solution échantillon en mg/l.

V : Volume final de la solution de minéralisation en ml (25ml).

P : Masse de l'échantillon en g (0,3g).

III.2.2.4 Analyses par spectrométrie de fluorescence X

La fluorescence X est une technique souvent utilisée pour l'analyse élémentaire de matériaux et de poudres minérales (sables, sédiments, ciments, poussières...).

La spectrométrie de fluorescence X (FRX) permet la détermination de la composition élémentaire de l'échantillon de manière qualitative et quantitative, c'est-à-dire de déterminer la nature et la quantité des atomes qui sont présents dans l'échantillon.

Cette technique est couramment pratiquée dans les industries métallurgiques, minières, pétrolières et dans les cimenteries, car elle présente les avantages suivants :

- Analyse multi-élémentaire : la quasi-totalité des éléments est analysée à l'exception des éléments très légers.
- C'est une technique adaptée à l'analyse de matrices diverses et complexes (poudres, minéraux, huiles, ciments, polymères, verres, céramiques...) pour déterminer la composition élémentaire.

III. 3 Estimation des contaminations

Plusieurs indices ont été calculés pour évaluer le taux de contamination, la contribution anthropique et le degré de toxicité des sédiments dans la Tafna par les éléments traces métalliques et les terres rares, le facteur d'enrichissement (**EF**), l'indice de géoaccumulation (**I_{geo}**), le degré de contamination (**CD**), le facteur de contamination (**CF**), l'indice de charge de pollution (**PLI**), Indice de risque écologique potentiel (**PER**). L'objectif était de contraindre l'évaluation de la pollution par le biais de plusieurs indicateurs.

III.3.1 Calcul des indices

III.3.1.1 Indice de géoaccumulation

Pour évaluer l'intensité de cette contamination métallique des sédiments, le calcul de l'indice de géoaccumulation a été utilisé. Ce critère introduit par Muller en 1981 a été utilisé dans la littérature dans des nombreux travaux de recherche. L'indice *I_{geo}* est basé sur la comparaison de la concentration d'un métal dans le sédiment étudié à celle issue du fond géologique régional selon la formule suivante :

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1,5 B_n)$$

C_n= concentration dans le sédiment pour l'élément n

B_n= Bruit de fond géochimique pour l'élément n

1,5= constante prenant en compte les fluctuations naturelles de la teneur d'une substance donnée dans un environnement, et les faibles influences anthropiques.

Pour notre étude, les valeurs de références **B_n** pour les métaux considérés sont issues du background de **Turkian et Wedepohl (1961)**. Enfin, les valeurs de *I_{geo}* ont permis d'établir une intensité de pollution qui va de la classe 0 (pas de pollution) à la classe 6 (sédiments extrêmement pollués) selon la classification de (**Muller (1981)**).

Tableau III.2: Evaluation de la contamination métallique à partir de l' $I_{géo}$, d'après Muller (1981)

Classe	Valeur	Intensité de pollution
0	$I_{géo} < 0$	Non pollué
1	$0 < I_{géo} < 1$	non pollué à modérément pollué
2	$1 < I_{géo} < 2$	Modérément pollué
3	$2 < I_{géo} < 3$	modérément pollué à sévèrement pollué
4	$3 < I_{géo} < 4$	Sévèrement pollué
5	$4 < I_{géo} < 5$	sévèrement pollué à très sévèrement pollué
6	$5 < I_{géo} < 6$	Très sévèrement pollué

III.3.1.2 Facteur d'enrichissement

Le calcul des facteurs d'enrichissement est communément utilisé comme approche dans la détermination des sources de métaux. Cette méthode consiste à utiliser un élément de référence d'origine terrigène, principalement l'Al, le Fe ou le Si qui sont reconnus comme émis par les sources terrigènes (Gao et al., 2002), afin de déterminer la part terrigène des apports métalliques. Le fer (Fe) a été choisi comme élément immobile de référence pour réaliser ce calcul. Ce choix repose sur le fait que le fer est naturellement présent dans les eaux et les sédiments de la zone d'étude et sa concentration naturelle dans les sédiments tend à être uniforme, et il s'associe aux fines particules. En plus, il fait partie des matériaux de référence largement utilisés dans la littérature. Les valeurs de référence utilisées sont ceux des Turekian et Wedepohl, (1961)

Ce facteur d'enrichissement est exprimé par la formule suivante :

$$FE = \frac{\{Me/Fe\} \text{ sédiment}}{\{Me/Fe\} \text{ référence}}$$

Les FE sont présentées sur le tableau ci-dessous (molawa et al. 2011, Belhadj 2018).

Tableau III.3: Les facteurs d'enrichissements

Facteur d'enrichissement (FE)	Catégories FE
Igéo $EF < 2$	Faible enrichissement
$2 \leq EF < 5$	Modérément enrichissement
$5 \leq EF < 20$	Modérément sévère enrichissement
$20 \leq EF < 40$	Sévère enrichissement
$EF \geq 40$	Extrêmement sévère enrichissement

III.3.1.3 Facteur et degrés de contamination

Il serait nécessaire d'exprimer les concentrations des ETM en fonction d'un paramètre lié à la nature du sédiment. Cette normalisation qui consiste à exprimer le ratio de la teneur d'une substance donnée par rapport à celle du facteur normalisant, permet de définir le facteur de contamination "FC" d'un élément trace donné dans le sédiment. Ce facteur de contamination est exprimé par la formule suivante :

$$FC = (C_n / B_n)$$

C_n : concentration mesurée pour un élément x,

B_n : Background pour un élément x,

De même que pour les autres indices, des classes de contamination sont définies pour le FC (Rubio et al., 2000). Le degré de contamination (DC) est la somme des FC, permet l'estimation de la contamination pour chaque point de prélèvement. Il est calculé selon la formule suivante :

$$DC = \sum FC$$

Tableau III.4 : Les classes de facteur et degré de contamination.

Facteur de contamination (FC)	Degré de contamination (DC)	Classe de contamination
$CF < 1$	$DC < 6$	contamination faible
$1 \leq FC < 3$	$6 \leq DC < 12$	contamination modérée
$3 \leq FC < 6$	$12 \leq DC < 24$	contamination considérable
$6 \leq FC$	$DC \geq 24$	contamination très forte

III.3.1.4 Indice de charge de pollution (PLI)

L'évaluation du degré de contamination a été aussi réalisée en utilisant l'indice de charge de pollution (**PLI**). Ce dernier a été largement utilisé pour évaluer le niveau de contamination et de pollution dans les sédiments. L'indice de charge de pollution (**PLI**) introduit par **Tomlinson et al., (1980)** est déterminé selon la relation suivante : FC_i

$$PLI = (FC_{i1} \times FC_{i2} \times FC_{i3} \times \dots \times n)^{1/n}$$

FC_i: Facteur de contamination du métal i,

n : nombre de métaux étudiés (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb et Cd). Dans notre cas n = 6.

Selon l'indice de charge polluante (**Tomlinson et al., 1980**), les classements sont présentés sur le tableau ci-dessous.

Tableau III.5: Evaluation de la contamination métallique à partir d'indice de charge de pollution (PLI)

l'indice de charge polluante (PLI)	Niveau de pollution
PLI < 1	aucune pollution
1 < PLI < 2	pollution modérée
2 < PLI < 3	forte pollution
3 < PLI	pollution extrêmement forte

III.3.1.5 Indice de risque écologique potentiel (PER)

Un dernier facteur peut être utilisé afin d'estimer le risque écologique dû aux éléments métalliques contenus dans les sédiments (**Cui, 2014. Maanan, 2015**) : l'indice de risque écologique (**PER**). Cet indice a été adopté pour la première fois par **Hakanson**, il prend en considération la concentration du polluant, le type de polluant, son degré de toxicité et la réponse environnementale par rapport à cette toxicité. Le PER est calculé à partir de l'équation suivante:

$$PER = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times FC_i$$

$$FC_i = C^i / C_n^i$$

D'où, E_r^i est le coefficient de risque écologique potentiel d'un élément ; T_r^i est le coefficient de toxicité d'un élément métallique particulier qui sont définis pour $Cu = Pb = 5$, $Zn = 1$, $Cd = 30$, and $Fe = Ni = 6$, ces valeurs sont basées sur des études similaires trouvées dans la littérature (Fu et al., 2009; Zhu et al., 2013); FC_i est le facteur de pollution, C^i est la concentration d'un élément dans le sédiment analysé, C_n^i est la concentration du même élément dans la référence. La référence dans notre cas est celle utilisée pour calculer les autres facteurs.

Les valeurs de E_r^i et de **PER** qualifient les sédiments en plusieurs classes afin d'évaluer le risque écologique que peut engendrer leur contamination (Tableau III.6).

Tableau III.6 Classification de la qualité des sédiments selon E_r^i et **PER**

E_r^i	Niveau de risque de pollution	PER	Niveau de risque de pollution
$E_r^i < 40$	Faible risque	$PER < 150$	Faible risque
$40 \leq E_r^i \leq 80$	Risque modéré	$150 \leq PER \leq 300$	Risque modéré
$80 \leq E_r^i \leq 160$	Risque considérable	$300 \leq PER \leq 600$	Risque considérable
$160 \leq E_r^i \leq 320$	Risque élevé	$600 \leq PER$	Risque très élevé
$320 \leq E_r^i$		-	Risque très élevé

III. 4 L'analyse statistique

L'étude statistique, l'ANOVA 1, 2, L'ACP (l'analyse en composante principale) et CAH (classification ascendante hiérarchique) a été réalisée en utilisant le logiciel Excel 2010 et Minitab version 16.

III.4.1- Analyse des variances (ANOVA)

Cette méthode s'applique indifféremment aux grands et aux petits échantillons. Elle présente l'avantage de vérifier en un seul test si les différences observées au niveau des moyennes d'un ensemble d'échantillon sont imputables aux fluctuations d'échantillonnage ou non. Le test ANOVA permet aussi de préciser les sources de variation donc de savoir, dans une étude à plusieurs variables, laquelle de ces variables influe le plus sur les moyennes finales. Dans notre cas, il s'agit d'étudier l'influence des variables comme le mois et la saison sur la teneur moyenne en métaux (Derrag, 2014).

Cette analyse consiste à tester l'hypothèse nulle H_0

$$H_0 = M_1 = M_2 = M_3 = \dots M_n$$

Cela se fait par le calcul de p (probabilité de rejet de H_0)

La lecture du tableau des résultats de l'analyse de la variance permet de vérifier la valeur de F et sa probabilité " p ": Si la valeur du F de Fisher présente un seuil de probabilité inférieur à 5 % ($p < 0,05$), l'hypothèse nulle est rejetée, donc la différence entre les moyennes est hautement significative (**Ramousse et al., 1995**).

III.4.2 Analyse des composantes principales (ACP)

Nous avons aussi effectué une analyse en composantes principales (ACP) qui est une technique qui permet de faire la synthèse des informations contenues dans un grand nombre de variables. Les composantes principales autorisent en outre la représentation graphique de grands tableaux de données trop complexes à décrire par les méthodes graphiques habituelles. C'est incontestablement cette propriété qui est à l'origine de sa large utilisation (**Falissard, 1998**). Un ensemble de n individus, associé à un ensemble p variables peut être représenté sous la forme d'un nuage de points dans un espace de dimension p . Le nuage de points représentant les individus est « centré-réduit » ce qui permet de donner la même « importance » à chaque variable dans le calcul des distances entre individus (**Volle, 1985**). Le but de l'ACP est de représenter ce nuage dans un espace de dimension réduite.

III.4.3 Classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification et de regroupement progressif de données multi variées d'échantillons. Le regroupement se fait par le calcul de la dissimilarité des données entre les objets que nous voulons regrouper.

Chapitre IV

RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Les paramètres physico-chimiques de l'eau

Un suivi temporel et spatial des principaux paramètres physico-chimiques (la température, le pH, la conductivité et la salinité) a été réalisé dans les cinq points de prélèvement de oued Tafna pendant la période allant de décembre 2012 à novembre 2013.

IV.1.1- variations mensuelles :

Les figures VI.1-4 présentent respectivement les variations mensuelles des paramètres physicochimiques mesurées (la température de l'eau et de l'air, le pH, la conductivité et la salinité) pendant une année dans les cinq points de prélèvement de oued Tafna.

IV.1.1.1- Température de l'eau et de l'air :

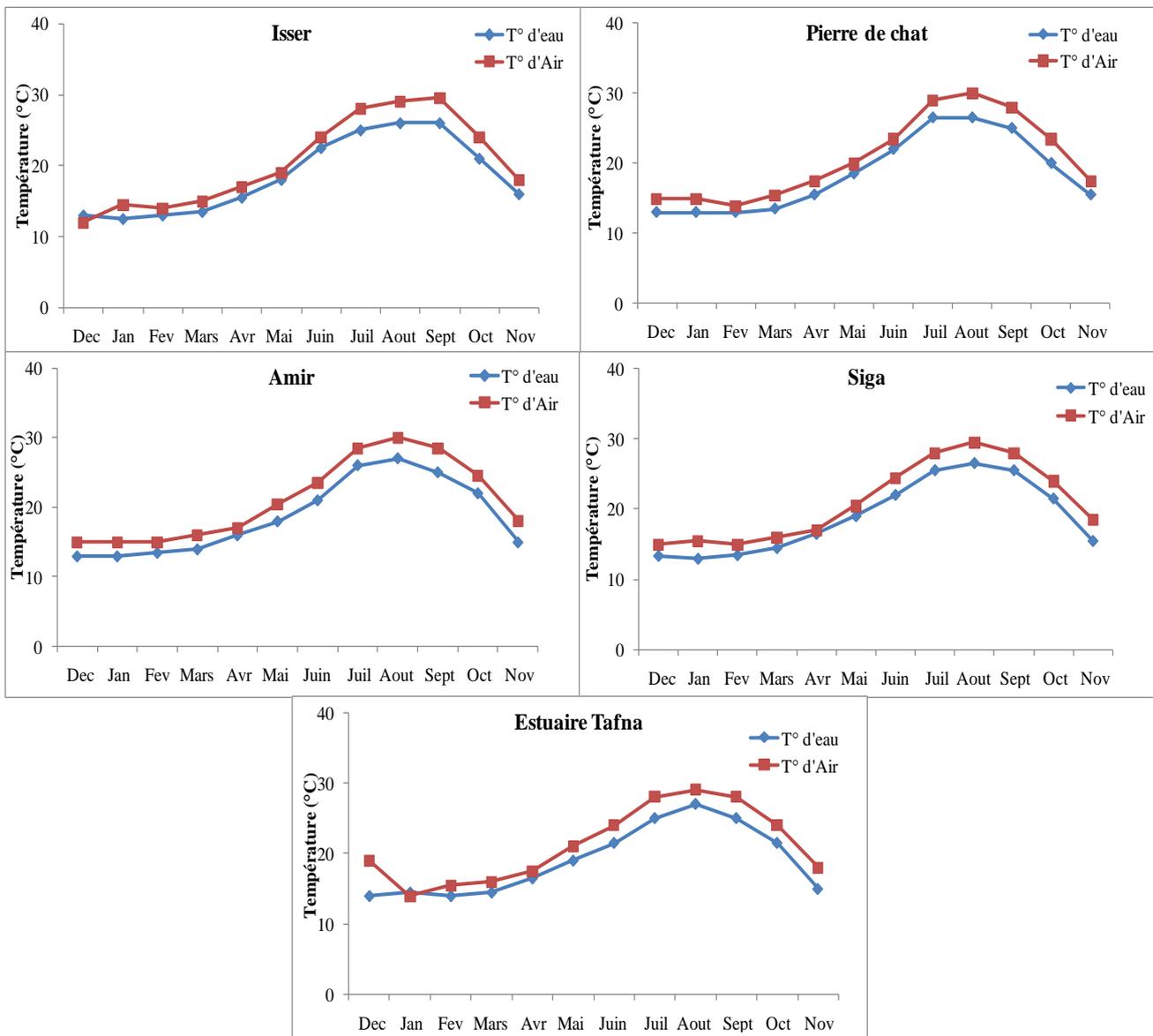


Figure IV.1: Variations mensuelles des températures de l'eau et de l'air

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Dans la zone d'étude, les variations mensuelles des températures de l'eau et de l'air (Figure IV.1) montrent un profil classique pour les cinq stations ; avec des maximums (27°C pour l'eau et 30°C pour l'air) qui correspondent au mois d'Aout et des minimums (12,5°C pour l'eau et 12°C pour l'air) enregistrés pendant le mois Décembre 2012. Globalement, la température de l'eau suit celle de l'air qui dépend du climat régional de type méditerranéen semi-aride à hiver chaud (**Emberger, 1955**). La température est un facteur écologique qui entraîne d'importantes répercutions écologiques (**Leynaud, 1968**). Elle agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, de même que sur les réactions chimiques et biochimiques, le développement et la croissance des organismes vivant dans l'eau et particulièrement les microorganismes (**W.H.O, 1987**).

IV.1.1.2 pH

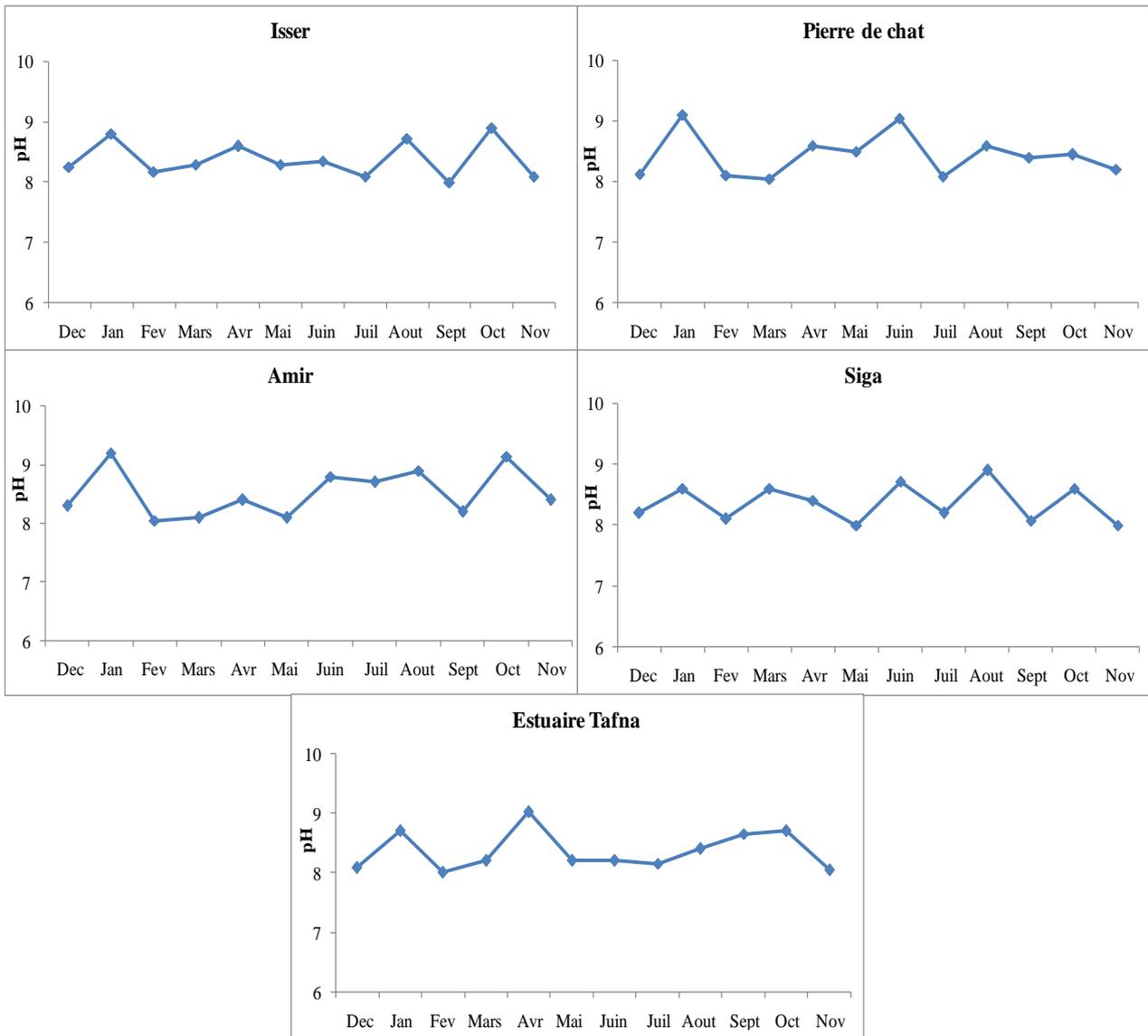


Figure IV.2: Variations mensuelles du pH

D'après la figure IV.2, la valeur du pH maximale est de 9,14 marqué durant le mois d'octobre à la station de l'Amir et la valeur minimale enregistrée est de 8 pendant le mois de février à l'estuaire de la Tafna, et pendant les mois de mai et novembre à Siga. Ces données recueillies montrent un pH basique qui peut être expliqué par la nature des sédiments dominée par les terrains calcaires et argileux (Collignon, 1986). Le pH dépend de l'origine des eaux, la nature des terrains traversés, la température et l'assimilation chlorophyllienne et la respiration des organismes (Nisbet et Verneaux, 1970). Des pH faibles augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique, ou alcalins dans les aquifères calcaires (Barnabé, 1991).

IV.1.1.3-la conductivité

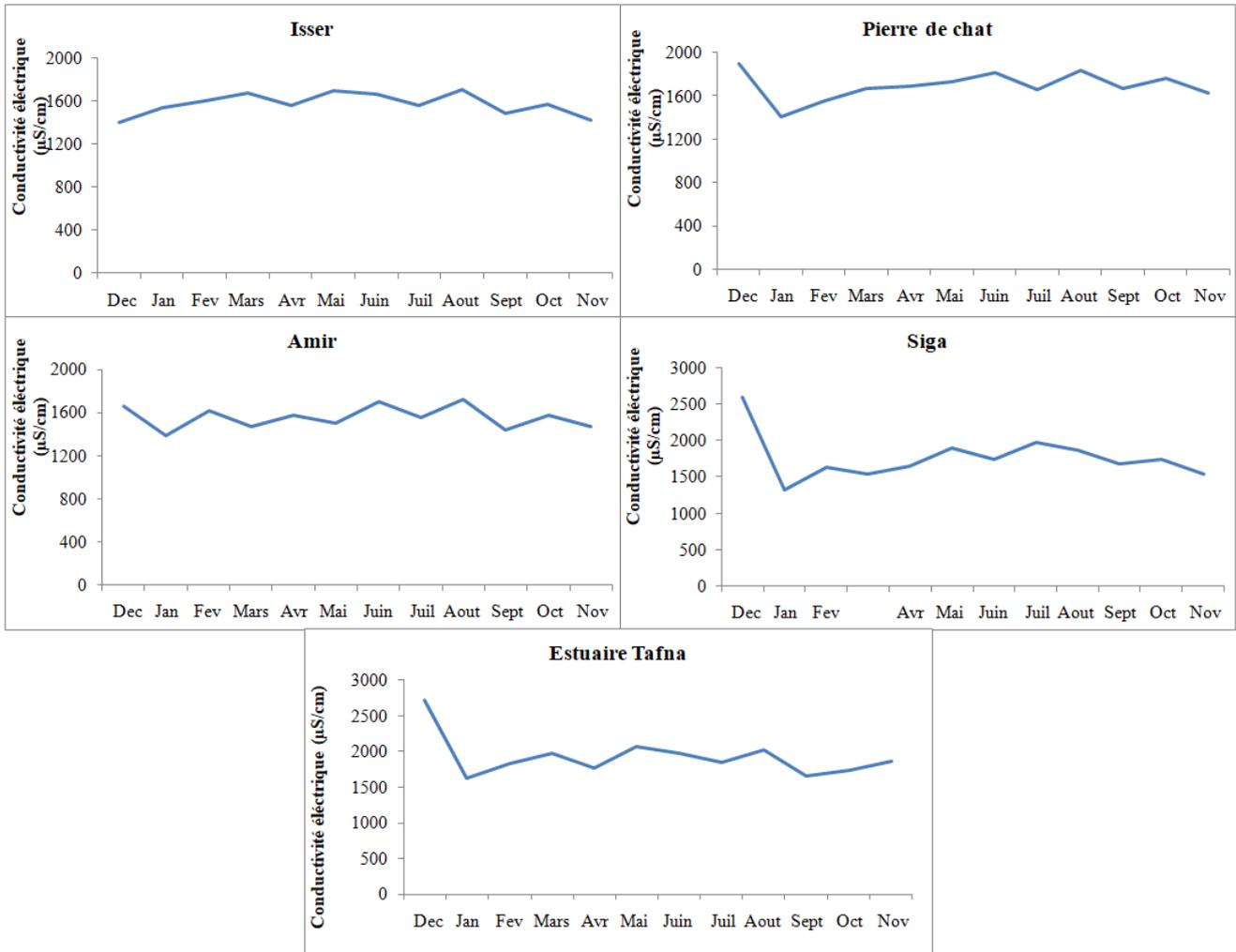


Figure IV.3: Variations mensuelles des conductivités

Selon la Figure IV.3, les conductivités illustrées durant notre période d'étude montrent des variations entre un maximum de (2720µS/cm) est enregistré pendant le mois de décembre à l'estuaire de la Tafna, et la plus basse valeur (1317µS/cm) est enregistrée durant le mois de janvier à Siga. Cette chute considérable s'explique par la dilution due aux eaux de pluie et les lâchers des barrages qui constituent une source occasionnelle non négligeable. Elle dépend de leur concentration en ions et de la température. Elle donne une bonne indication des changements de la composition des eaux et spécialement de leurs concentrations en minéraux.

IV.1.1.4-Salinité

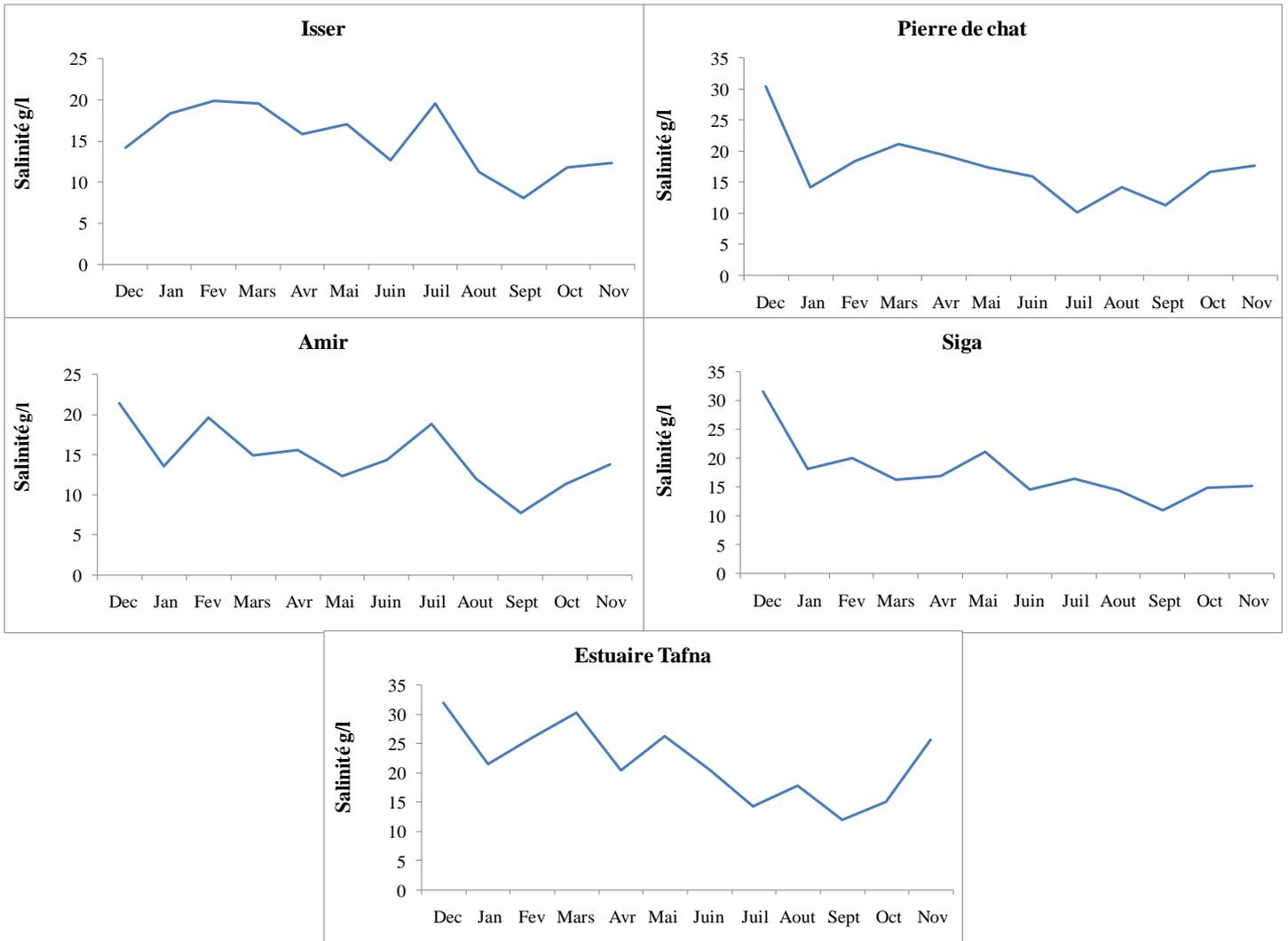


Figure IV.4: Variations mensuelles de la Salinité (g/l)

La mesure de la salinité, permet d'identifier les masses d'eaux et de suivre leur mélange au large, à la côte ou dans les estuaires. Cette grandeur représente la proportion de sels minéraux dissous (Duinker et al., 1982).

Généralement la salinité varie avec un maximum pendant le mois de décembre à l'estuaire (31,84 g/l) et un minimum à Amir pendant le mois de septembre (7,73 g/l). Nous remarquons que la plus grande valeur est celle de mois de décembre pour toutes.

L'étude de la variance à deux facteurs sans répétitions ANOVA 2, pour la température de l'eau et de l'air et le pH ne révèle aucune différence significative inter mois et inter stations, (p (lignes et colonne) $P > 0,05$).

Pour la conductivité, l'ANOVA 2 montre aucune différence significative inter mois (p (lignes) $> 0,05$) et une différence hautement significative inter stations (p (colonnes) $=0,0002$) et inversement pour la salinité.

IV.1.2 Variations saisonnières

Les figures IV.5-8 représentent respectivement les variations saisonnières des paramètres physico-chimiques (la température de l'eau et de l'air, le pH, la conductivité et la salinité) dans nos stations.

IV.1.2.1- Température de l'eau et d'air

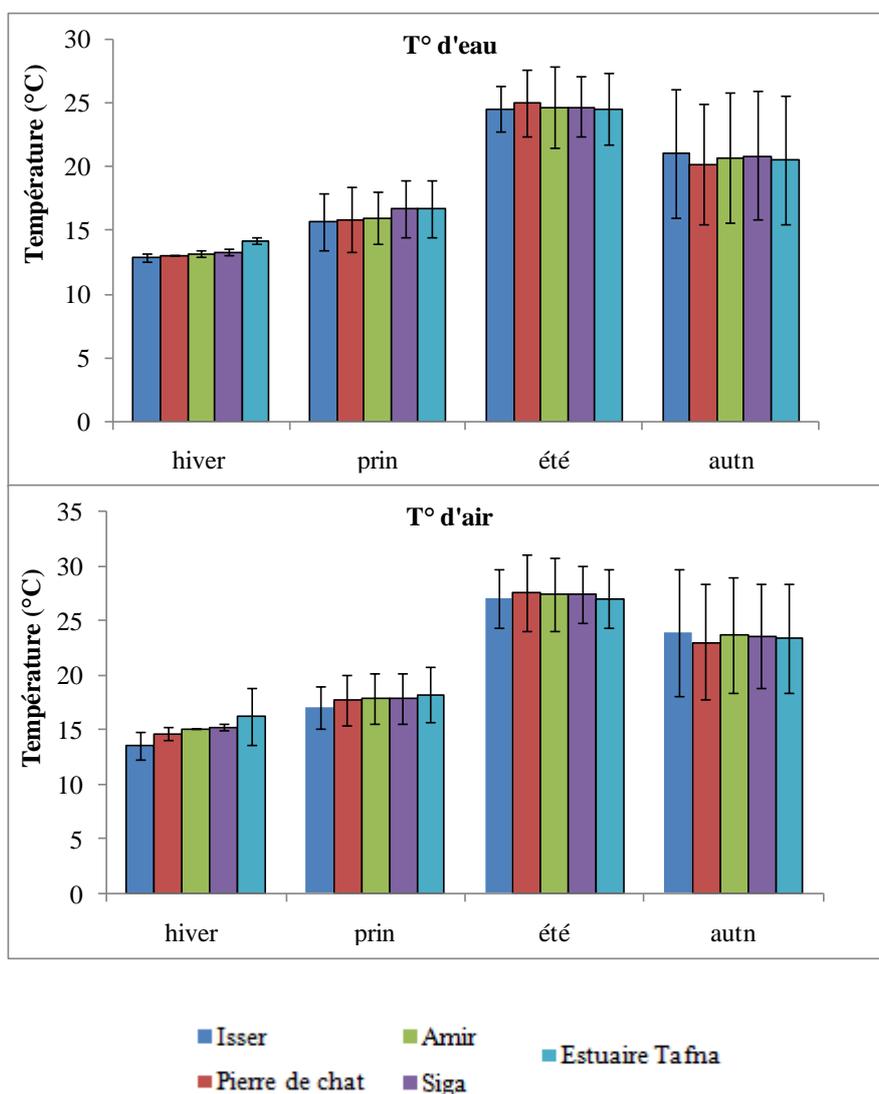


Figure IV.5 Variations saisonnières des températures de l'eau et de l'air

Les variations saisonnières des températures de l'eau et de l'air montrent qu'il n'y a pas un grand changement pendant les saisons pour les cinq points, avec des maximums pendant l'été de $25 \pm 2,6^\circ\text{C}$ pour l'eau, de $27,5 \pm 3,5^\circ\text{C}$ pour l'air, respectivement de l'amont vers l'aval et des minimums pendant la saison hivernale avec $12,8 \pm 0,3^\circ\text{C}$, pour l'eau et $13,5 \pm 1,23^\circ\text{C}$ pour l'air. La température de l'eau dépend de la température de l'air et cette dernière est contrôlée par plusieurs paramètres (altitude, occupation du sol, humidité de l'air).

IV.1.2.2- pH

Les variations saisonnières du pH de l'eau montrent une stabilité pendant toutes les saisons pour les cinq points de prélèvement, les valeurs de pH varient entre $8,2 \pm 0,3$ et $8,8 \pm 0,1$. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il n'y a pas des rejets importants pendant toute l'année, qui peuvent influencer sur le pH de l'eau.

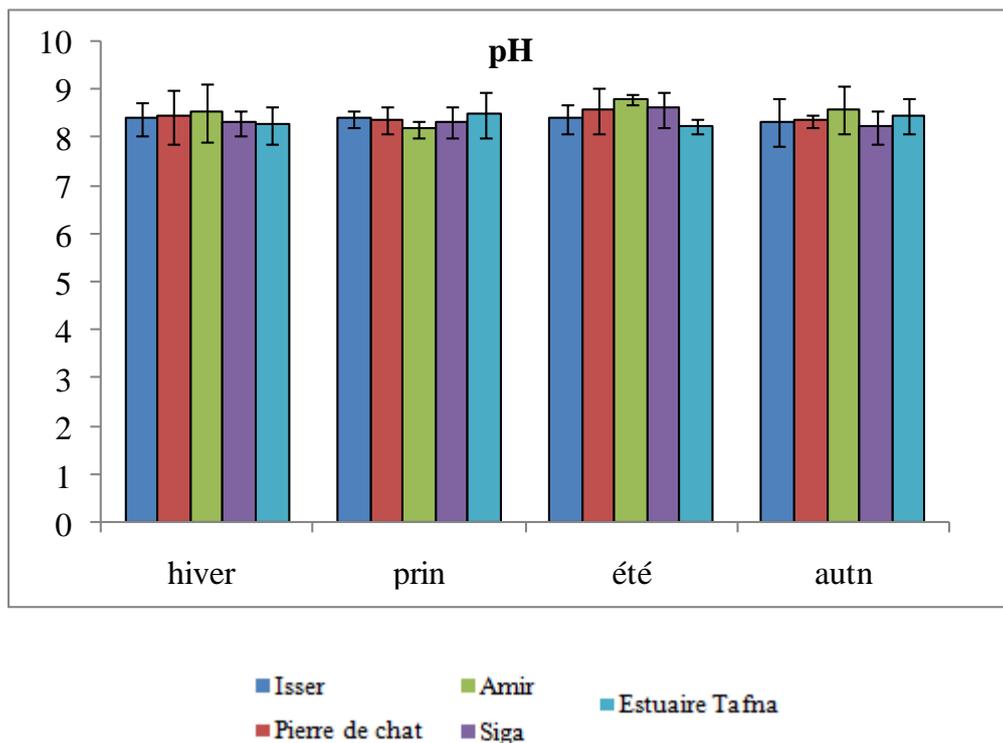


Figure IV.6: Variations saisonnières du pH

IV.1.2.3 - Conductivité

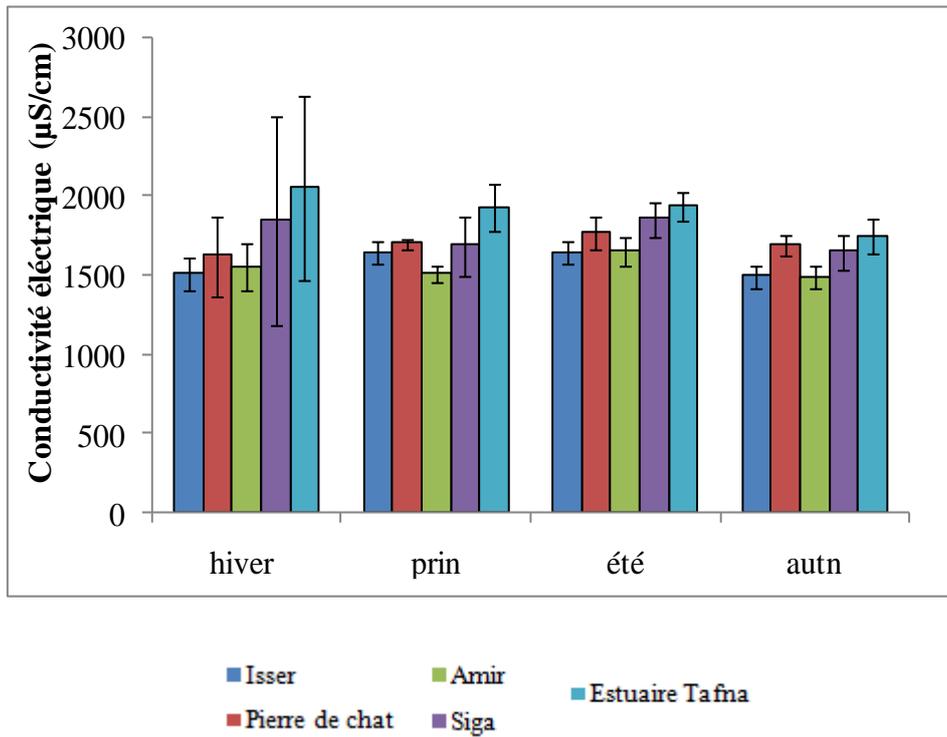


Figure IV.7: Variations saisonnières des conductivités

La figure IV.7 représente les variations saisonnières des conductivités et montre un maximum de $2056,3 \pm 58,4 \mu\text{S/cm}$ à l'estuaire de Tafna et un minimum de $1491,7 \pm 73,3(\mu\text{S/cm})$ à la station Isser pendant la saison hivernale à la station Isser.

IV.1.2.4-Salinité

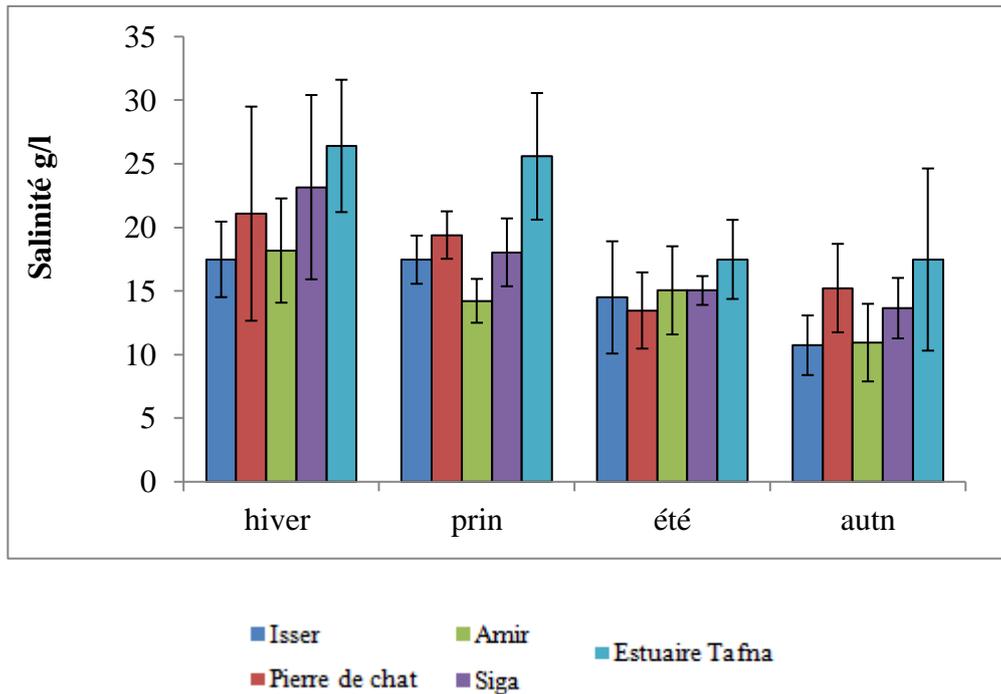


Figure IV.8: Variations saisonnières des Salinités (g/l)

La variation saisonnière de la salinité montre une diminution de l’hiver à l’automne pour les cinq points avec la plus grande valeur $26,4 \pm 5,2$ g/l pendant hiver à l’estuaire et la petite valeur $10,7 \pm 2,3$ g/l en automne à Isser.

IV.1.3 Variations spatiales

Les figures IV.9-12 représentent respectivement les variations spatiales des paramètres physico-chimiques (la température de l’eau et de l’air, le pH la conductivité et la salinité) pour les cinq points choisis lors de cette étude.

IV.1.3.1 Température de l'eau et d'air

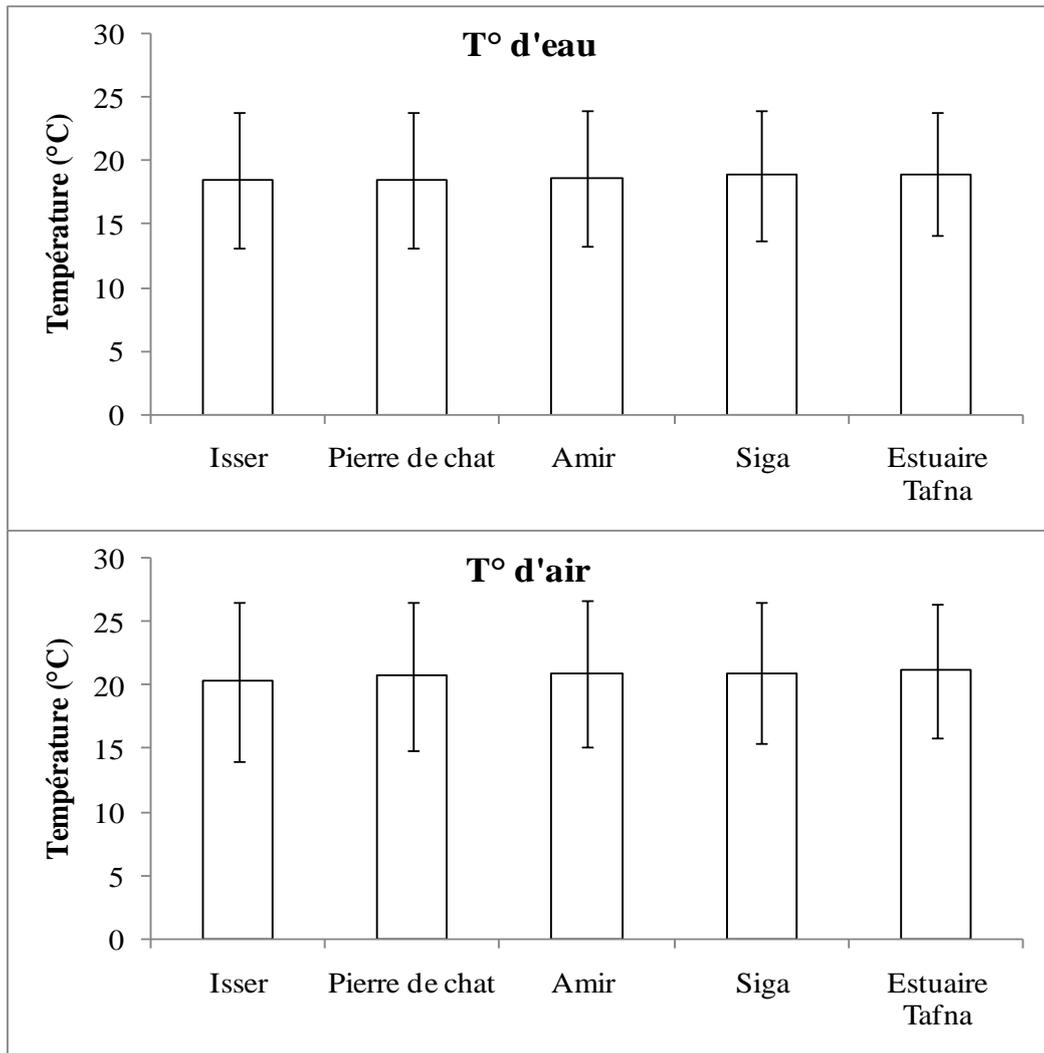


Figure IV.9: Variations spatiales des températures de l'eau et de l'air

Selon la figure les résultats révèlent peu de variations dans les cinq stations au cours de la période d'étude. Les valeurs enregistrées de la température varient de 18,5°C ±5,34 à 18,96°C ±4,87 pour l'eau et de 20,33°C ±6,29 à 21,17°C ±5,30 pour l'air à Isser et l'estuaire de la Tafna.

IV.1.3.2 pH

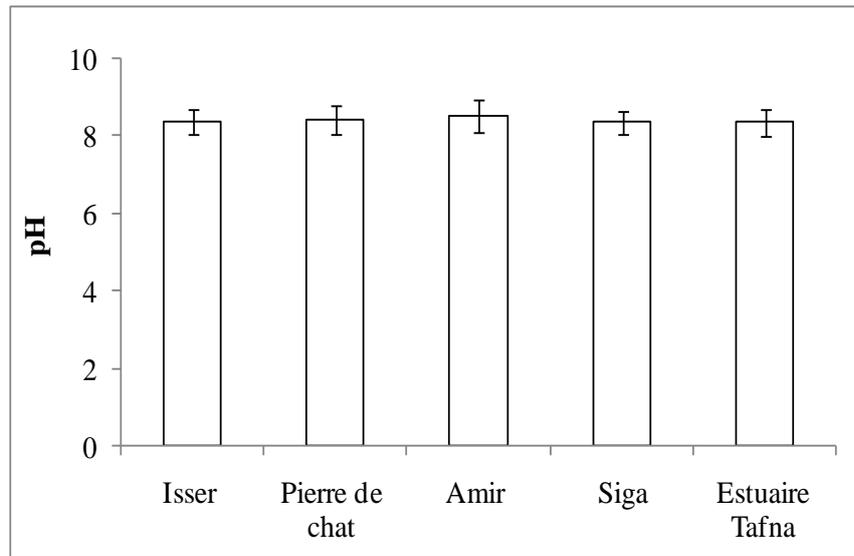


Figure IV.10 : Variations spatiales du pH

Selon la figure IV.10 les résultats du pH révèlent peu de variations dans les cinq points de prélèvements au cours de la période d'étude, varie entre $8,36 \pm 0,33$ à l'estuaire et $8,52 \pm 0,41$ à Amir. Nous pouvons dire le pH reste stable pendant tout l'année

IV.1.3.3 Conductivité :

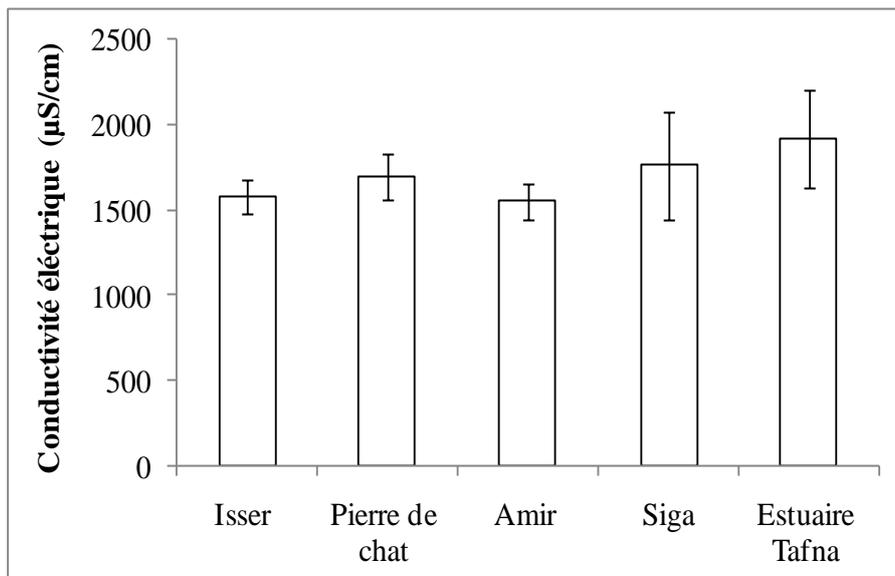


Figure IV.11: Variations spatiales des conductivités en µS/cm

La conductivité varie de l'amont avec une valeur minimum de $1552 \pm 102,3 \mu\text{S}/\text{cm}$ à Amir et une valeur maximale de $1921 \pm 160,4 \mu\text{S}/\text{cm}$ à l'estuaire de la Tafna.

IV.1.3.4 Salinité

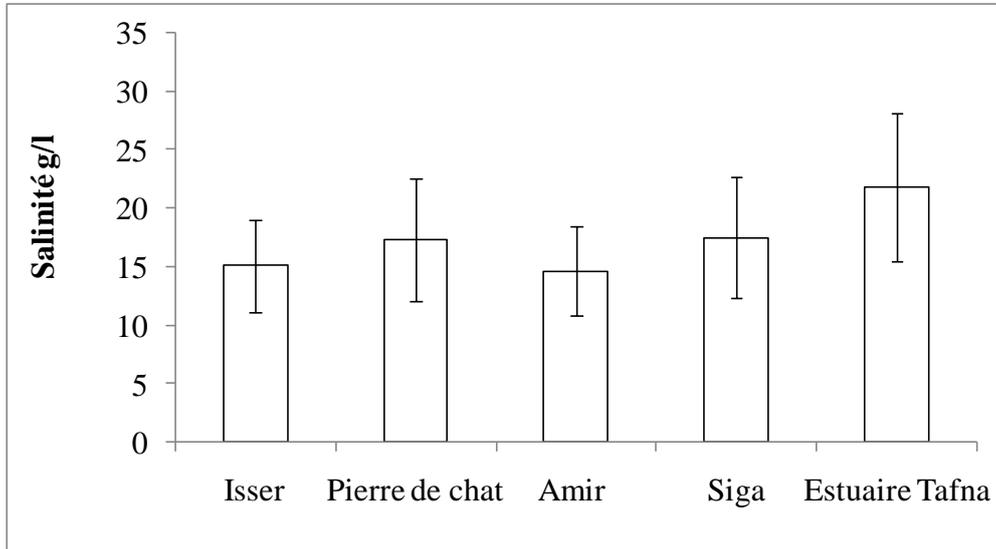


Figure IV.12 : Variations spatiales de la Salinité (g/l).

La figure IV.12 représente les variations spatiales de la salinité. Le minimum est de $14,6 \pm 3,8 \text{ g/l}$ à Amir et le maximum est $21,74 \pm 5,93 \text{ g/l}$ à l'estuaire.

Généralement, les valeurs des paramètres physico-chimiques augmentent de l'amont vers l'aval. Ceci peut être dû à des facteurs naturels tel que l'érosion et l'altération (selon les types de roche notamment, avec la présence des roches évaporitiques en milieu de parcours et des carbonates en amont) et/ou anthropique (influence des grandes villes et des activités industrielles) (Benabdelkader, 2018).

IV.2- Teneurs en métaux lourds dans l'eau

IV.2.1 Variations mensuelle

Dans cette partie, nous donnons les variations mensuelles des métaux lourds (Fe, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd) lors de cette étude dans les eaux de surfaces des cinq stations de prélèvement. Les résultats des teneurs en fer, cuivre, nickel, plomb, zinc, et en cadmium (mg/l) dans les eaux pour les différents points sont présentés sur les figures IV.13-18. La valeur en haut de chaque graphes représente dans chacune des figures représentent les normes selon critères de qualité de l'eau recommandés (EPA ,2004).

IV.2.1.1 Fer

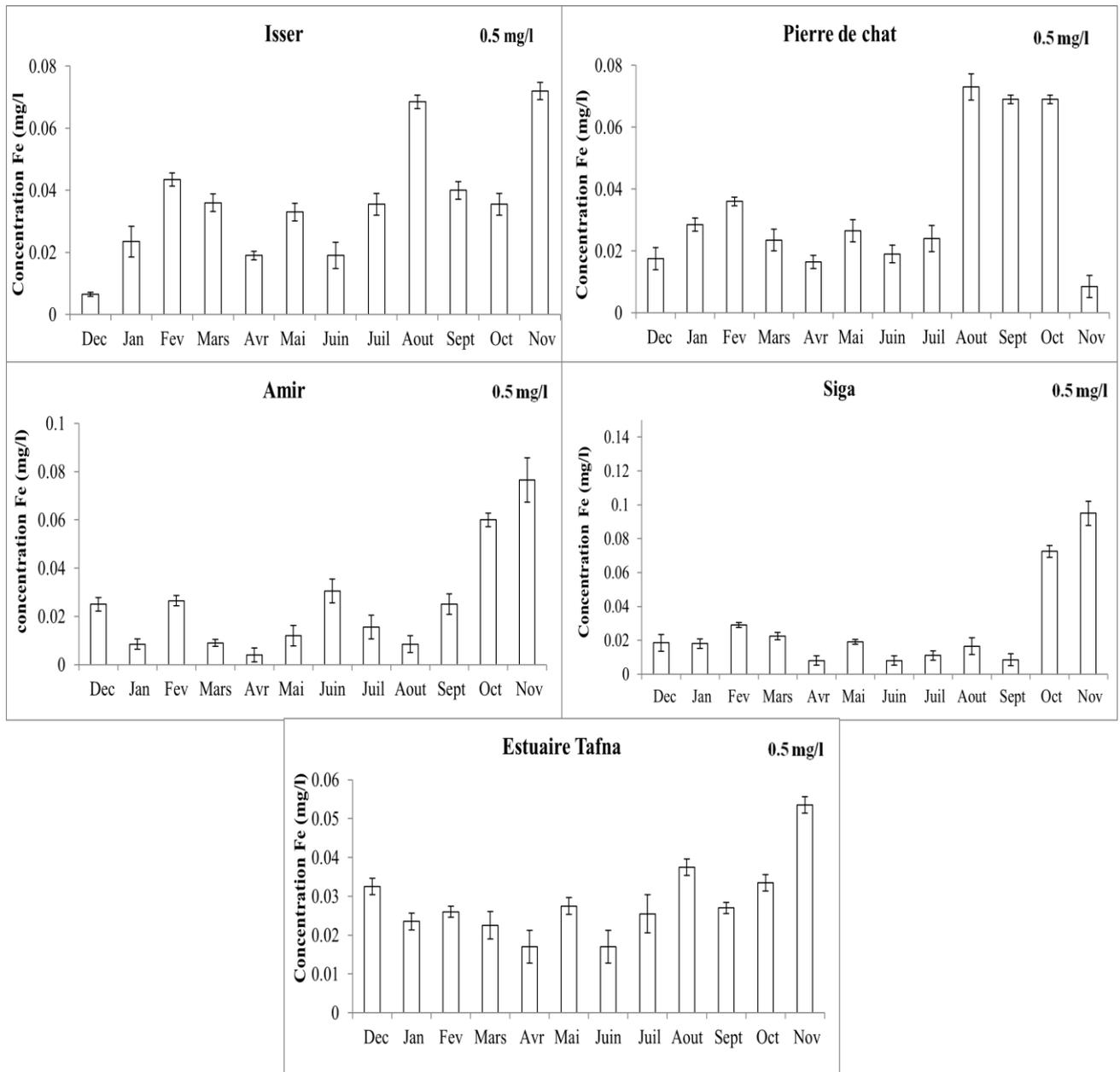


Figure IV.13: Variations mensuelles des concentrations en fer (mg/l) dans l'eau

IV.2.1.2 Cuivre

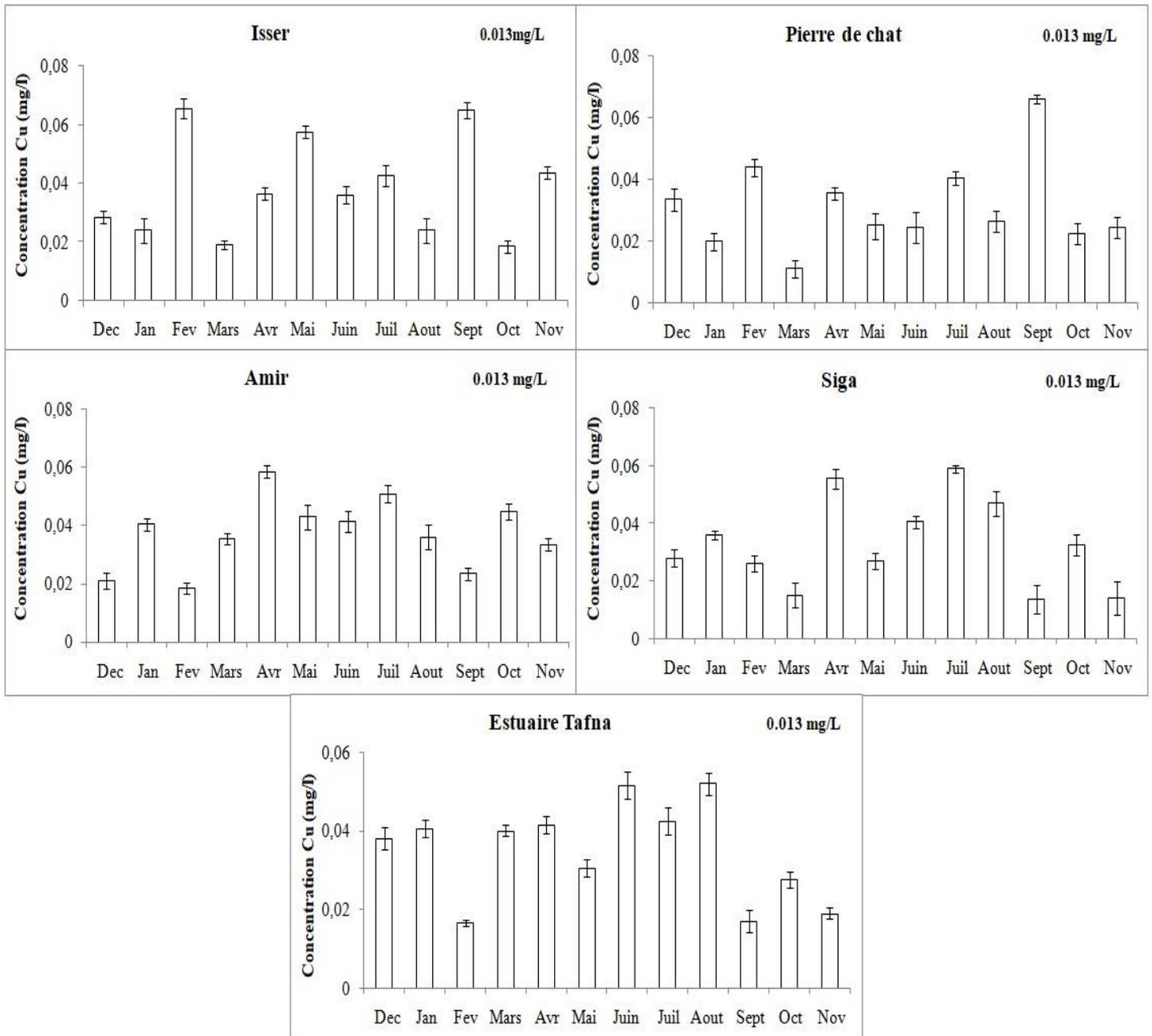


Figure IV.14: Variations mensuelles des concentrations de cuivre (mg/l) dans l'eau

IV.2.1.3 Nickel

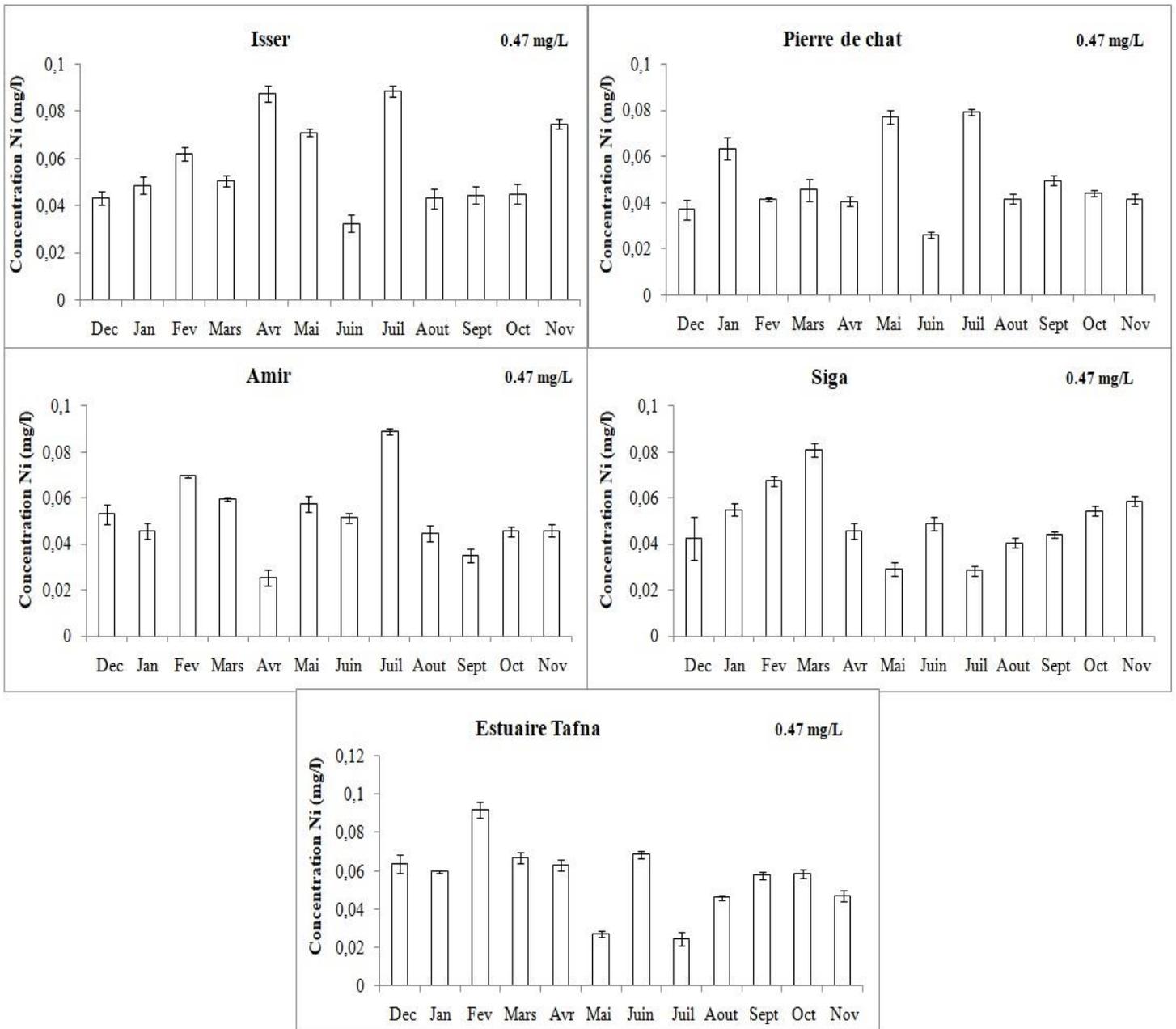


Figure IV.15: Variations mensuelles des concentrations de nickel (mg/l) dans l'eau

IV.2.1.4 Plomb

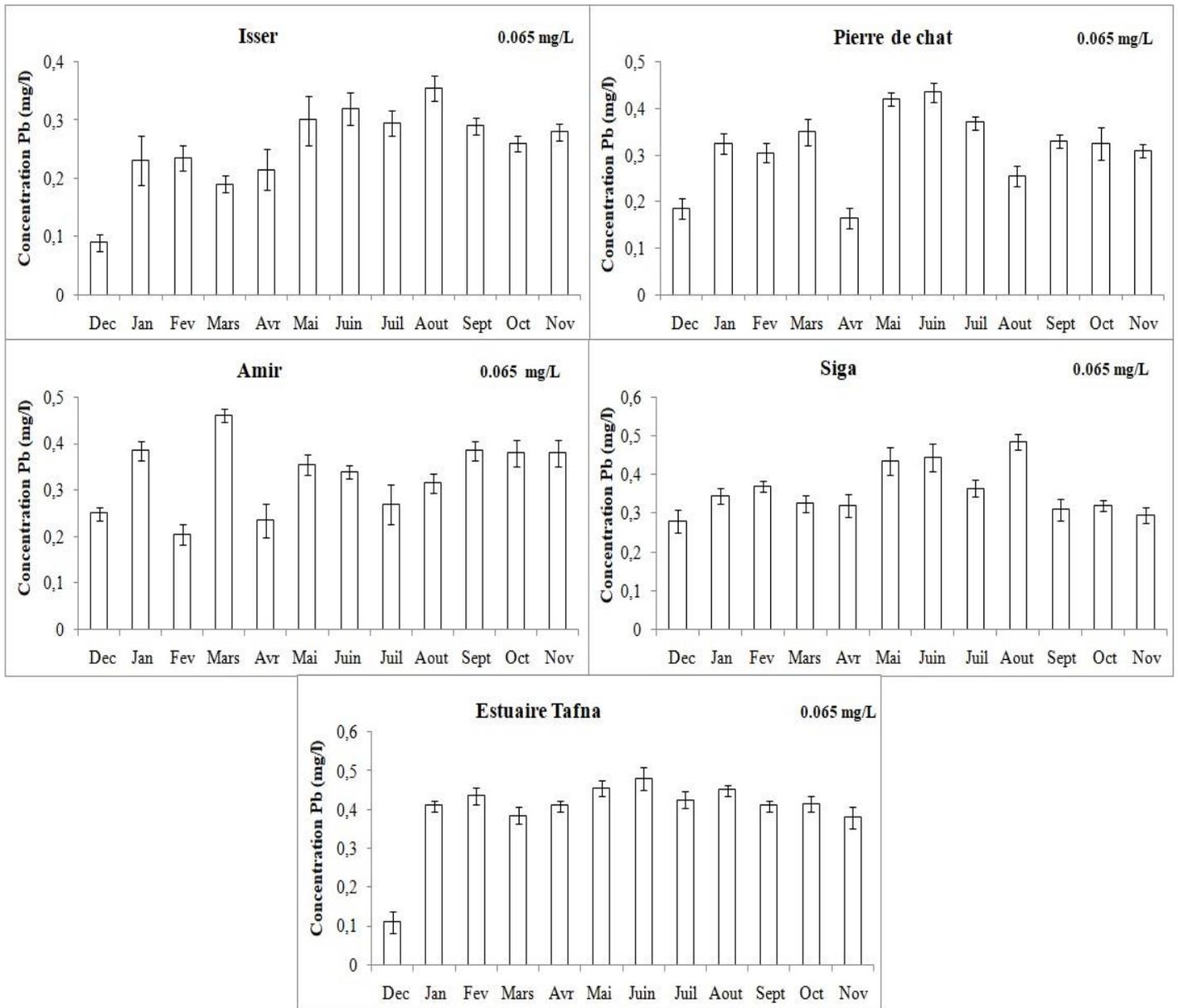


Figure IV.16 : Variations mensuelles des concentrations du plomb en (mg/l) dans l'eau

IV.2.1.5 Zinc

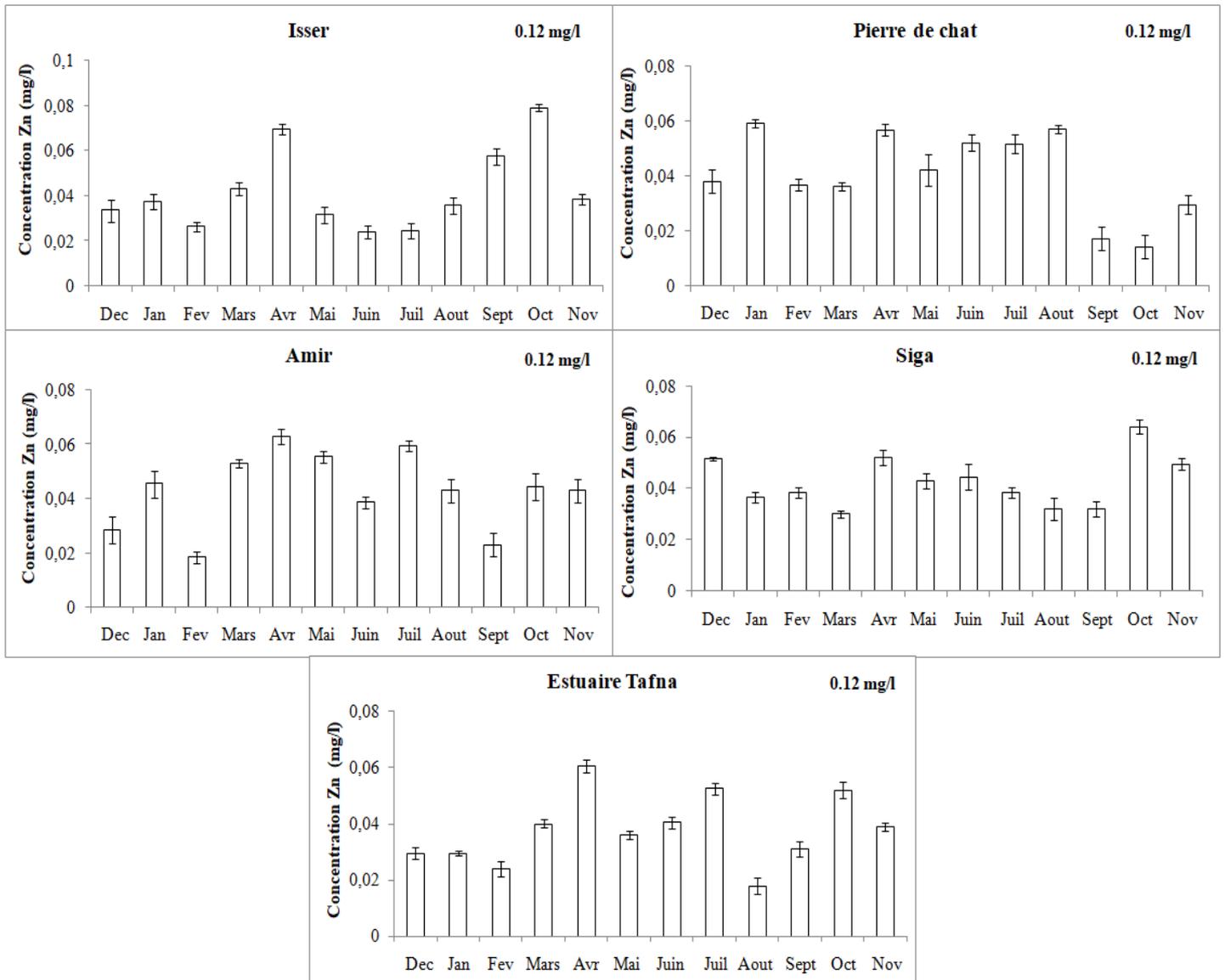


Figure IV.17 : Variations mensuelles des concentrations du zinc (mg/l) dans l'eau

IV.2.1.6 Cadmium

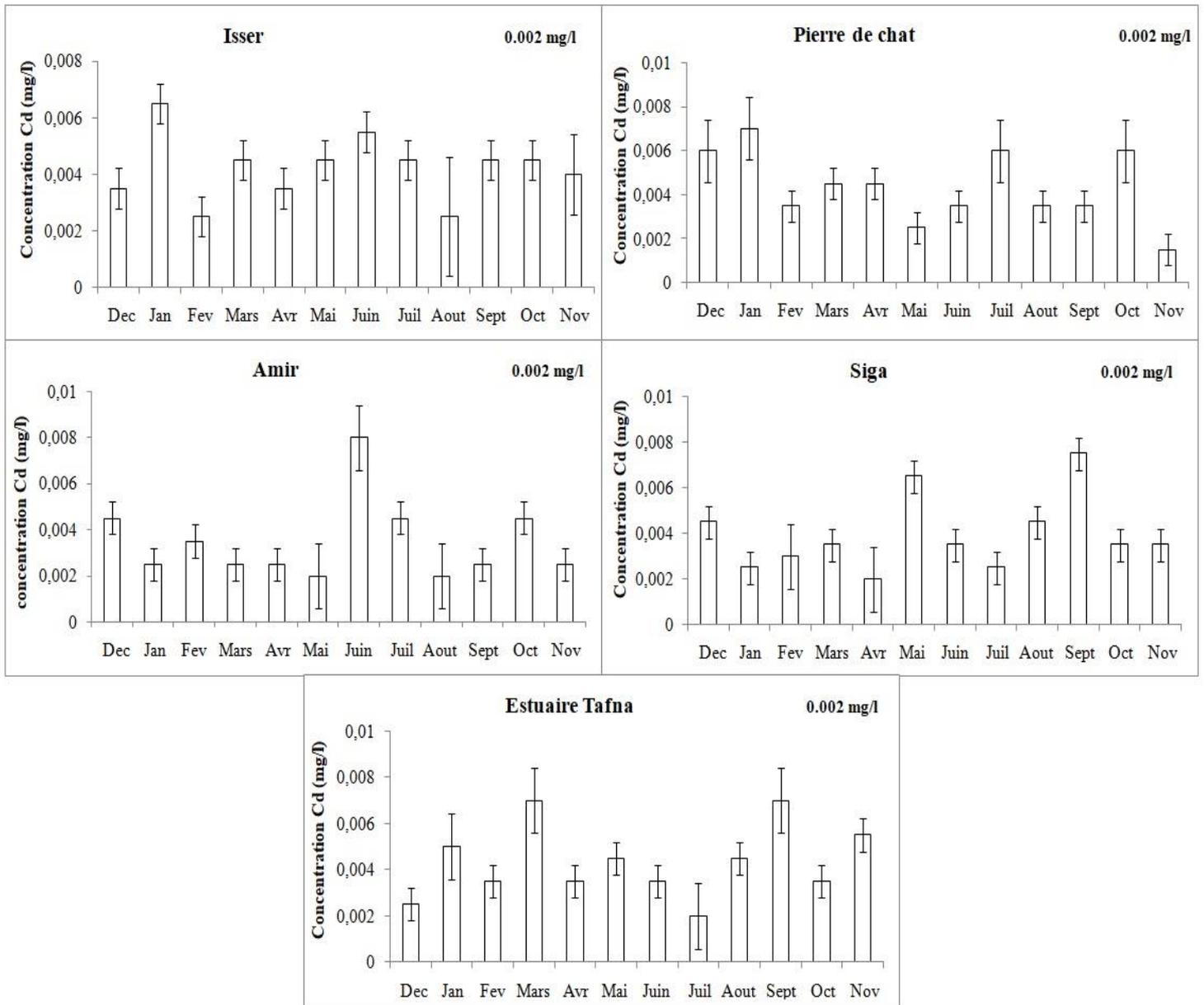


Figure IV.18: Variations mensuelles des concentrations du cadmium (mg/l) dans l'eau

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Les concentrations obtenues pour le **fer** pendant la période d'étude sont faibles en générale avec une augmentation pendant les mois de septembre, octobre et novembre. D'une manière globale que toutes les valeurs restent au-dessous de la norme de qualité des eaux superficielles (0,5 mg/l) avec une valeur maximale de $0,095 \pm 0,0071$ mg/l à Siga pendant le mois de novembre et minimale $0,004 \pm 0,0028$ mg/l pendant le mois d' avril à Amir. Nous observe aussi que tous les stations touchent leur maximum pendant le mois de novembre.

Pour le **cuivre**, nous notons une teneur minimale de l'ordre de $0,011 \pm 0,0028$ mg/l pendant le mois de mars et une teneur maximale de l'ordre de $0,066 \pm 0,0014$ mg/l pendant le mois de septembre à Pierre du chat. La plus parts des valeurs dépassent pas la valeur moyenne de référence (0,013 mg/l).

Le **nickel** a comme valeur minimale $0,025 \pm 0,0035$ à Amir pendant le mois d'Avril, et une valeur maximale $0,092 \pm 0,004$ mg/l pendant le mois de février à l'estuaire. En générale les valeurs ne dépassent pas la valeur moyenne de référence 0,47 mg/l (**EPA (2004)**).

Toutes les valeurs du **plomb** sont très élevées par rapport à la valeur moyenne de référence 0,065 mg/l. Nous pouvons dire qu'il y a une pollution par le plomb dans les cinq stations. Nous notons une valeur minimale de $0,09 \pm 0,01$ mg/l à Isser pendant le mois de décembre et une valeur maximale de $0,48 \pm 0,028$ mg/l pendant le mois de juin à l'estuaire de la Tafna.

En ce qui concerne les variations mensuelles du **zinc**, la valeur minimale enregistrée à Pierre du chat pendant le mois d'octobre est de $0,014 \pm 0,0042$ mg/l et la valeur maximale a été enregistrée pendant le mois d'avril à Isser $0,069 \pm 0,002$ mg/l. Ces valeur sont très loin de la valeur moyenne de référence (0,12 mg/l) (**EPA, 2004**).

Selon la figure IV.18 les concentrations du **cadmium** fluctuent entre $0,0015 \pm 0,0007$ mg/l notée pendant le mois de novembre à Pierre du chat et $0,008 \pm 0,0014$ mg/l durant mois de Juin à Amir. Les concentrations relevées au niveau de ce site d'étude dépassent largement le seuil des eaux superficielles préconisé de 0,002 mg/l par le (**EPA ,2004**).

L'étude de la variance à deux facteurs sans répétitions ANOVA 2 pour l'accumulation du cuivre du cadmium et plomb ne donne aucune différence significative inter mois et inter stations (p (lignes) et colonnes $> 0,05$). Pour le zinc et fer, il y a des différences significatives à hautement significatives inter station (p (colonne) $> 0,0005$).

IV.2.2 Variations saisonnières :

Sur la figure IV.19, nous présentons les variations saisonnières des teneurs métalliques saisonnières dans l'eau pour les cinq points de prélèvement.

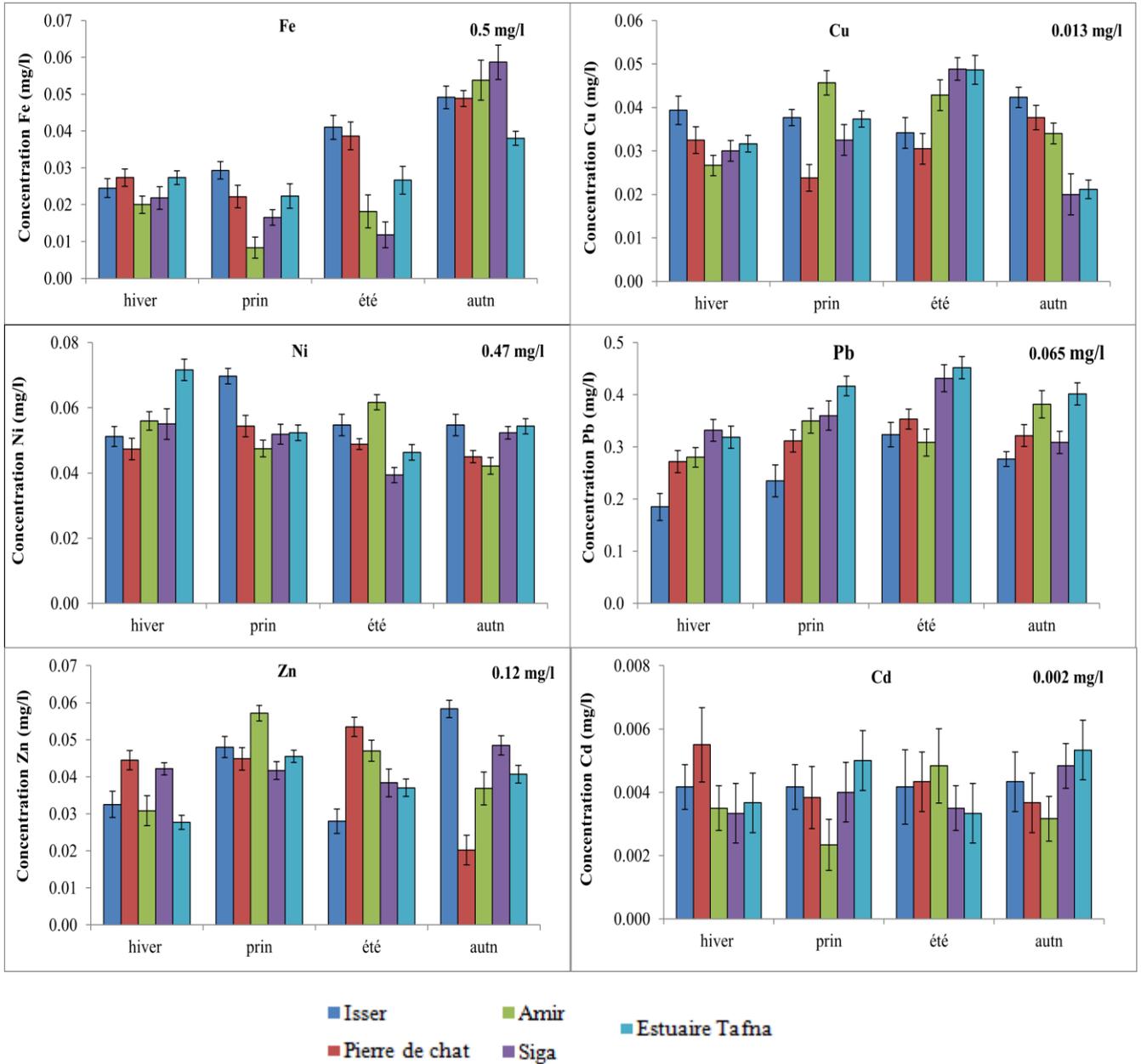


Figure IV.19: Variations saisonnières des concentrations moyennes des métaux (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) dans l'eau

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Les teneurs saisonnières en **fer** augmentent en automne. La valeur minimale est de $0,008 \pm 0,002$ mg/l à Amir pendant le printemps et la valeur maximale est de $0,059 \pm 0,0047$ mg/l à Siga en automne. Les teneurs sont très loin par rapport à la valeur moyenne de référence 0,5 mg/l.

La variation saisonnière du **cuivre** montre une valeur minimale de $0,002 \pm 0,0047$ mg/l à Siga pendant l'automne, et une valeur maximale à l'estuaire avec une valeur de $0,049 \pm 0,0033$ mg/l pendant l'été. Toutes les valeurs dépassent à la valeur moyenne de référence 0,013 mg/l.

La valeur minimale du **nickel** était $0,039 \pm 0,0024$ mg/l pendant l'été pour Siga, et une valeur maximale de $0,072 \pm 0,003$ mg/l à l'estuaire pendant l'hiver.

Les concentrations du **plomb** sont tous supérieurs à la valeur moyenne de référence (0,065 mg/l), nous remarquons que la variation à presque le même rythme pour les quatre saisons, elle augment de l'amont ($0,185 \pm 0,026$ mg/l) vers l'aval ($0,452 \pm 0,021$ mg/l) pendant la période estivale à la station d'estuaire.

La concentration moyenne saisonnière du **zinc** inscrite sa valeur maximale dans la station Isser pendant l'automne ($0,058 \pm 0,002$ mg/l), et de pierre du chat pendant le printemps $0,057 \pm 0,002$ mg/l. les concentrations maximums des stations sont presque les même valeur et ne dépassent pas la valeur de référence (0,12 mg/l).

La variation saisonnière pour le **cadmium** montre qu'il ya une pollution de cadmium, les valeurs sont tous supérieurs à la valeur moyenne de référence (0,002 mg/l). la concentration moyen à Isser reste stable pendant tous les saisons ($0,0042 \pm 0,007$ mg/l), avec un maximum pendant l'hiver à Pierre du chat ($0,0055 \pm 0,0012$ mg/l).

ANOVA 2 ne révèle aucune différence significative pour l'accumulation du cuivre, du nickel, du zinc et du cadmium inter saisons et inter station (p (lignes et p colonnes) $> 0,05$). Pour le plomb, par contre il y a une différence significative inter station (p (colonnes)=0,006) et une différence hautement significative pour le fer inter station (p (colonnes)=0,0006).

IV.2.3 Variations spatiales

Sur la figure IV.20, nous présentons les variations spatiales des teneurs métalliques moyennes annuelles contenues dans l'eau de surface des cinq stations.

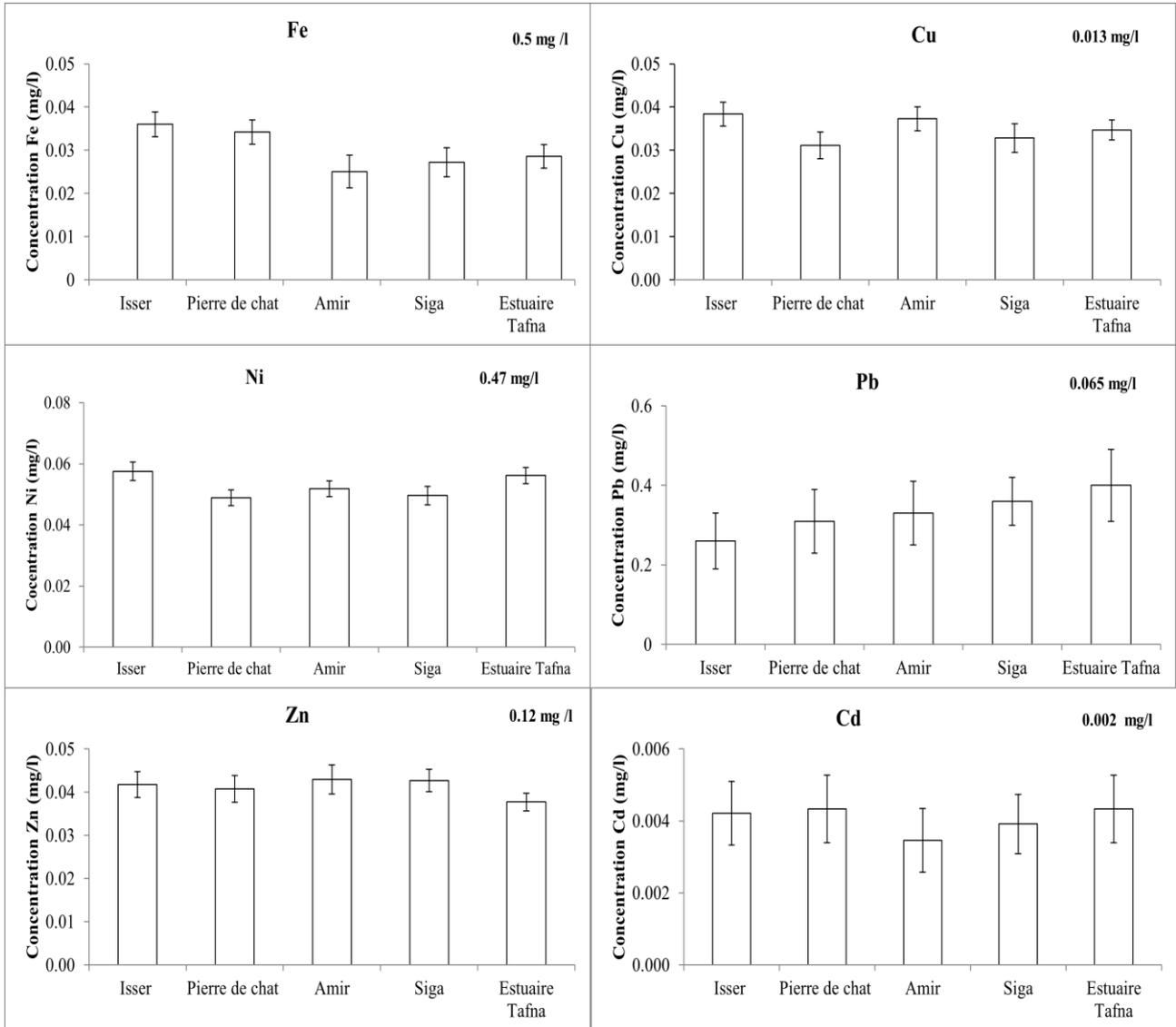


Figure IV.20: Variations spatiales des concentrations moyennes des métaux (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) dans l'eau

La variation spatiale du **Fer** montre généralement une diminution de l'amont vers l'aval avec l'inscription une valeur minimale à Amir $0,025\pm 0,0038$ mg/l et la plus grande valeur à la station Isser $0,036\pm 0,0028$ mg/l, mais ils sont toujours loin de la limite selon les normes (0,5 mg/l).

La concentration moyenne annuelle du **cuivre** présente un minimum à Pierre du chat $0,031\pm 0,0031$ mg/l et le maximum à Amir $0,038\pm 0,0028$ mg/l. Les valeurs tous sont supérieures à la valeur moyenne de référence (0,013 mg/l).

La variation du **nickel** inscrite la valeur minimale à Pierre du chat $0,049\pm 0,0025$ mg/l et les valeurs maximums dans les extrémités ; Isser $0,058\pm 0,003$ mg/l. Nous pouvons dire que la moyenne reste plus ou moins stable de l'amont vers l'aval.

Pour le **plomb**, la variation annuelle montre une augmentation de l'amont vers l'aval, avec le minimum à Isser $0,26\pm 0,07$ mg/l et un maximum à l'estuaire Tafna avec la valeur de $0,4\pm 0,09$ mg/l. Les valeurs sont supérieurs à la valeur de référence 0,065 mg/l donc il y a une présence du plomb dans l'eau.

La figure montre aussi que la moyenne annuelle du **zinc** dans les quatre stations Isser, Pierre du chat, Amir et Siga varie peu. Un minimum est enregistré à l'estuaire de la Tafna $0,038\pm 0,0021$ mg/l et le maximum est de $0,042\pm 0,0031$. Les valeurs restent loin de la valeur de référence (0,12 mg/l).

La variation spatiale du **cadmium** enregistre une valeur minimale à Amir $0,0035\pm 0,0009$ mg/l et une valeur maximale à l'estuaire de la Tafna avec la valeur $0,0043\pm 0,0008$ mg/l. Toutes les valeurs sont supérieures à la valeur moyenne de référence 0,003 mg/l.

IV.3 Teneurs en métaux lourds dans les sédiments

IV.3.1 Analyses par spectrométrie de fluorescence X (FRX)

La composition élémentaire des cinq échantillons de manière qualitative et quantitative été déterminée par la méthode d'analyse par spectrométrie de fluorescence X. Les résultats sont représentés sur le tableau IV.1.

Tableau IV.1: résultats d'analyse FRX des sédiments

FRX	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Isser	65,54	4,77	2,66	10,61	1,01	0,06	0,91	0,11	13,49
Pierre du chat	52,04	9,61	5,92	11,6	1,98	0,18	1,13	0,11	16,35
Amir	46,66	12,86	6,63	10,44	2,07	0,04	1,55	0,11	18,02
Siga	45,71	12,46	5,88	11,45	2,30	0,09	1,59	0,11	19,2
Estuaire Tafna	45,85	11,02	5,29	12,78	2,34	0,10	1,62	0,10	19,57

Le tableau montre la composition des sédiments, nous remarquons qu'il contient de quartz (SiO₂) avec le plus grand pourcentage pour toutes les stations. C'est le composant majeur, 65,54% à Isser, 52,04 % à pierre du chat, 46,66% à Amir, 45,71% à Siga et 45,85 à l'estuaire de la Tafna. Le pourcentage de SiO₂ diminue de l'amant vers l'aval. Les sédiments contiennent aussi de l'Alumine (Al₂O₃) avec des différents pourcentages, contrairement au quartz, il augmente de l'amant vers l'aval avec un minimum de 4,77% et un maximum de 11,02%. Il représente le deuxième plus grand constituant pour les sédiments. Nous trouvons aussi dans sa composition la chaux (CaO) avec des pourcentages aussi important varie entre 10,61% et 12,78% de Isser jusqu'à l'estuaire Tafna. La chaux c'est le deuxième plus grand composant se trouve dans les sédiments d'Isser, Pierre du chat et l'estuaire de la Tafna. L'oxyde de fer (Fe₂O₃) est aussi parmi les constituants des notre sédiments avec les pourcentages suivants (2,66%, 5,92%, 6,63%, 5,88%, 5,29%), nous trouvons aussi l'oxyde de manganèse (MgO) avec des faibles pourcentages varie entre 1,01% à Isser et 2,34% à l'estuaire de la Tafna.

Des constituants de très faibles pourcentages sont présents comme le trioxyde de soufre (SO₃), l'oxyde de potassium (K₂O), l'oxyde de sodium (Na₂O). Il y a aussi un pourcentage de la perte aux feux (LOI : loss on ignition).

IV.3.2 Teneurs des métaux lourds

Les teneurs en éléments traces métalliques présents dans les sédiments dans les cinq points de prélèvement sont présentées sur les figures IV.21-28. La ligne horizontale dans chacune des figures indique la valeur moyenne de référence pour chaque élément d'après Turekian et Wedepohl (1961).

IV.3.2.1 Variations mensuelles

Les résultats des concentrations métalliques mensuelles (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb et Cd) des échantillons des sédiments pour les cinq stations sont présentés respectivement sur les figures IV.21-26.

IV.3.2.1.1 Fer

Sur la figure IV.21, nous présentons les variations mensuelles des concentrations de fer en g/kg dans les sédiments des cinq stations.

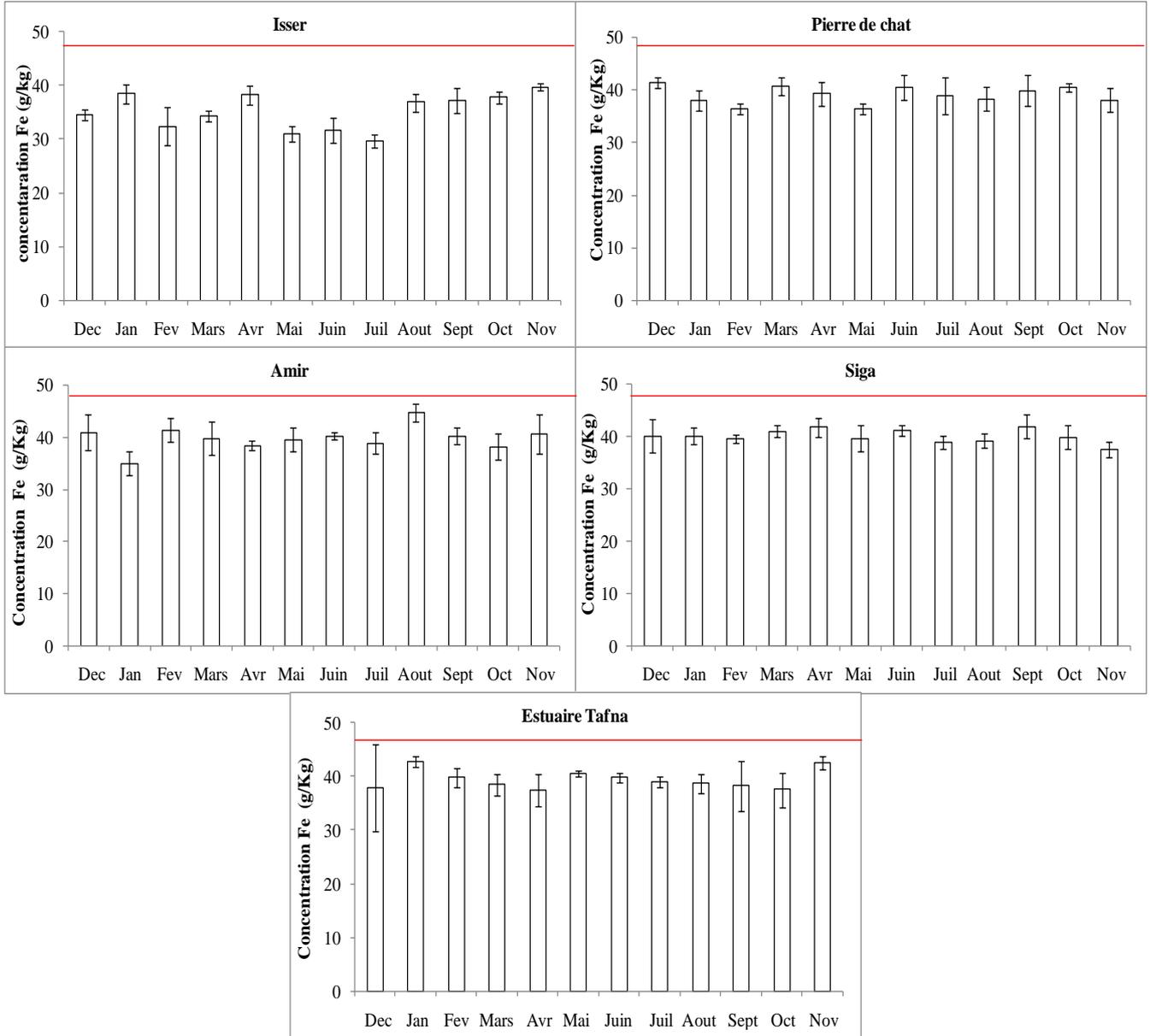


Figure IV.21: Variations mensuelles des concentrations de fer en g/kg dans les sédiments

IV.3.2.1.2 Cuivre

Sur la figure IV.22, nous présentons les variations mensuelles des concentrations de cuivre en mg/kg dans les sédiments des cinq stations.

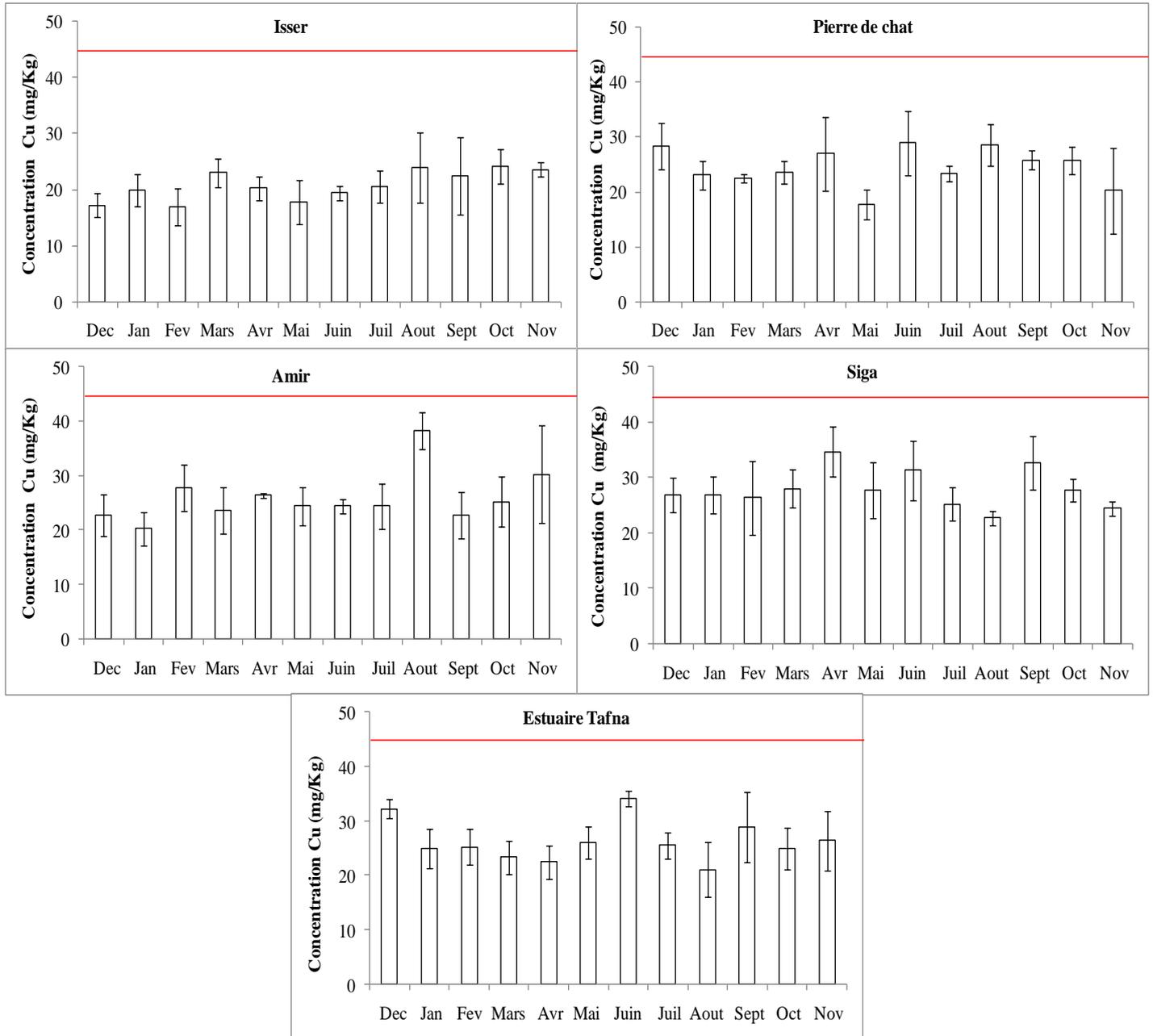


Figure IV.22 : Variations mensuelles des concentrations de cuivre en mg/kg dans les sédiments

IV.3.2.1.3 Zinc

Sur la figure IV.23, nous présentons les variations mensuelles des concentrations de zinc en mg/kg dans les sédiments des cinq stations.

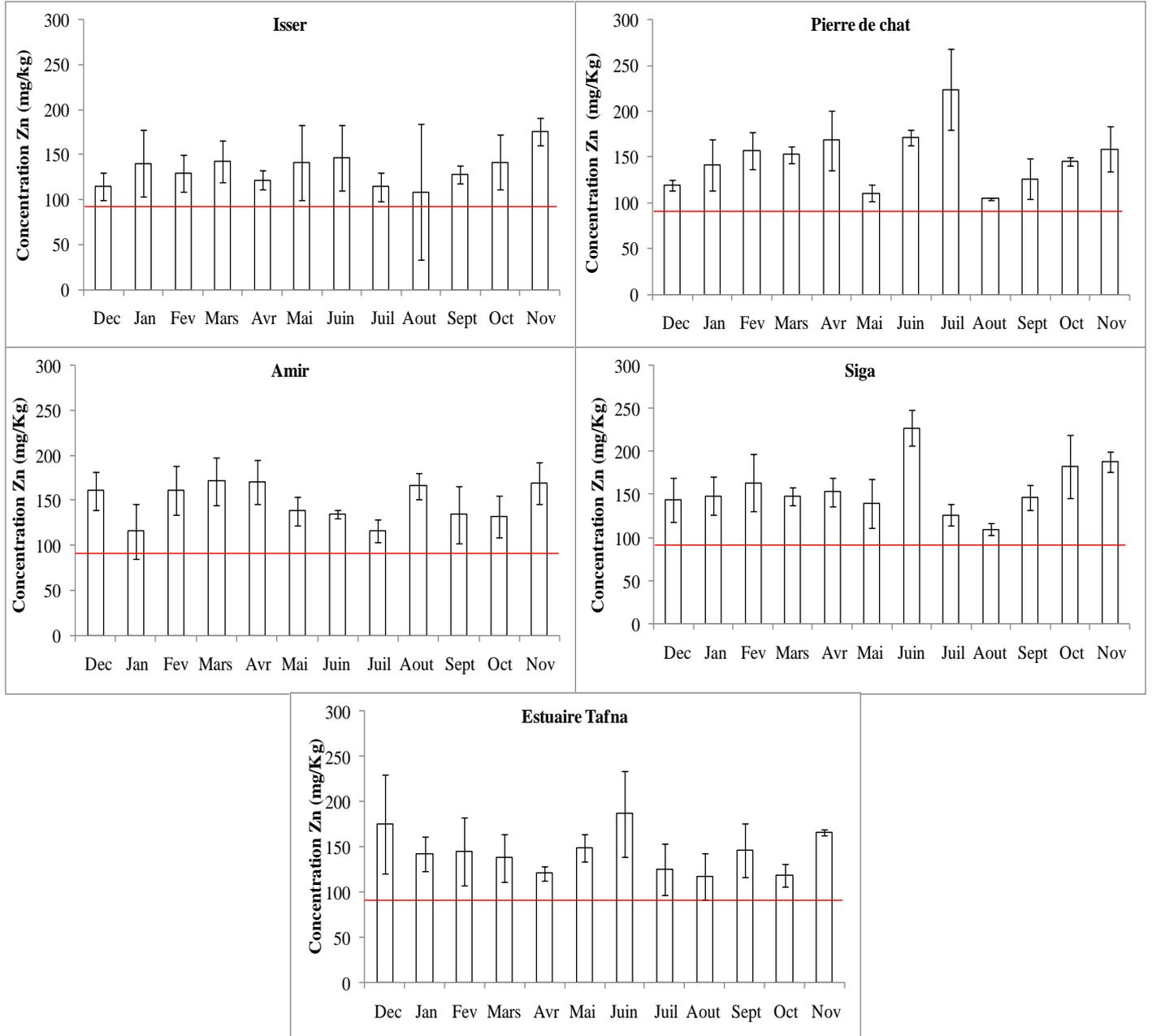


Figure IV.23 : Variations mensuelles des concentrations de zinc en mg/kg dans les sédiments

IV.3.2.1.4 Nickel

Sur la figure IV.24, nous présentons les variations mensuelles des concentrations de nickel en mg/kg dans les sédiments des cinq stations.

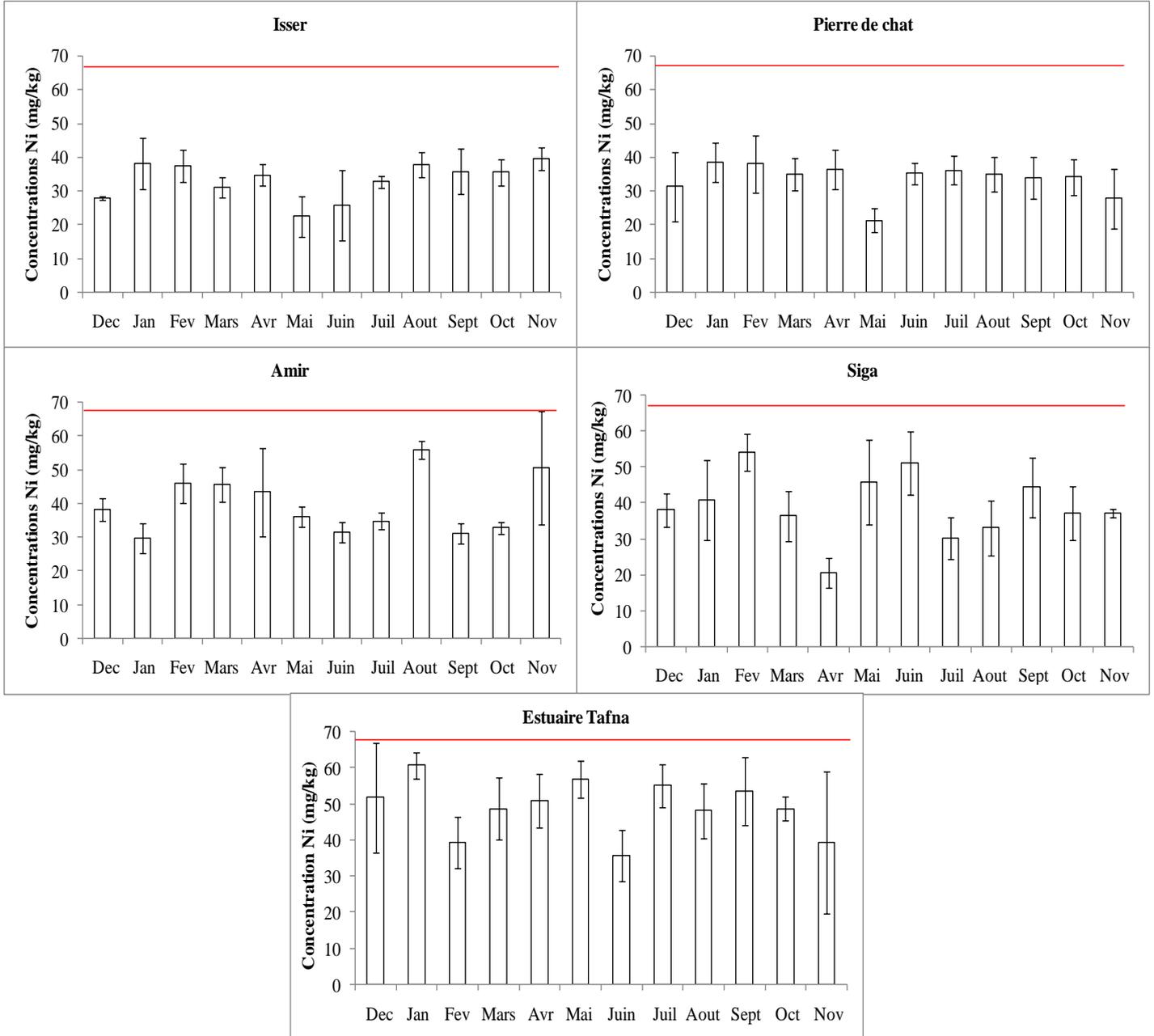


Figure IV.24: Variations mensuelles des concentrations de nickel en mg/kg dans les sédiments

IV.3.2.1.5 Plomb

Sur la figure IV.25, nous présentons les variations mensuelles des concentrations de plomb en mg/kg dans les sédiments des cinq stations.

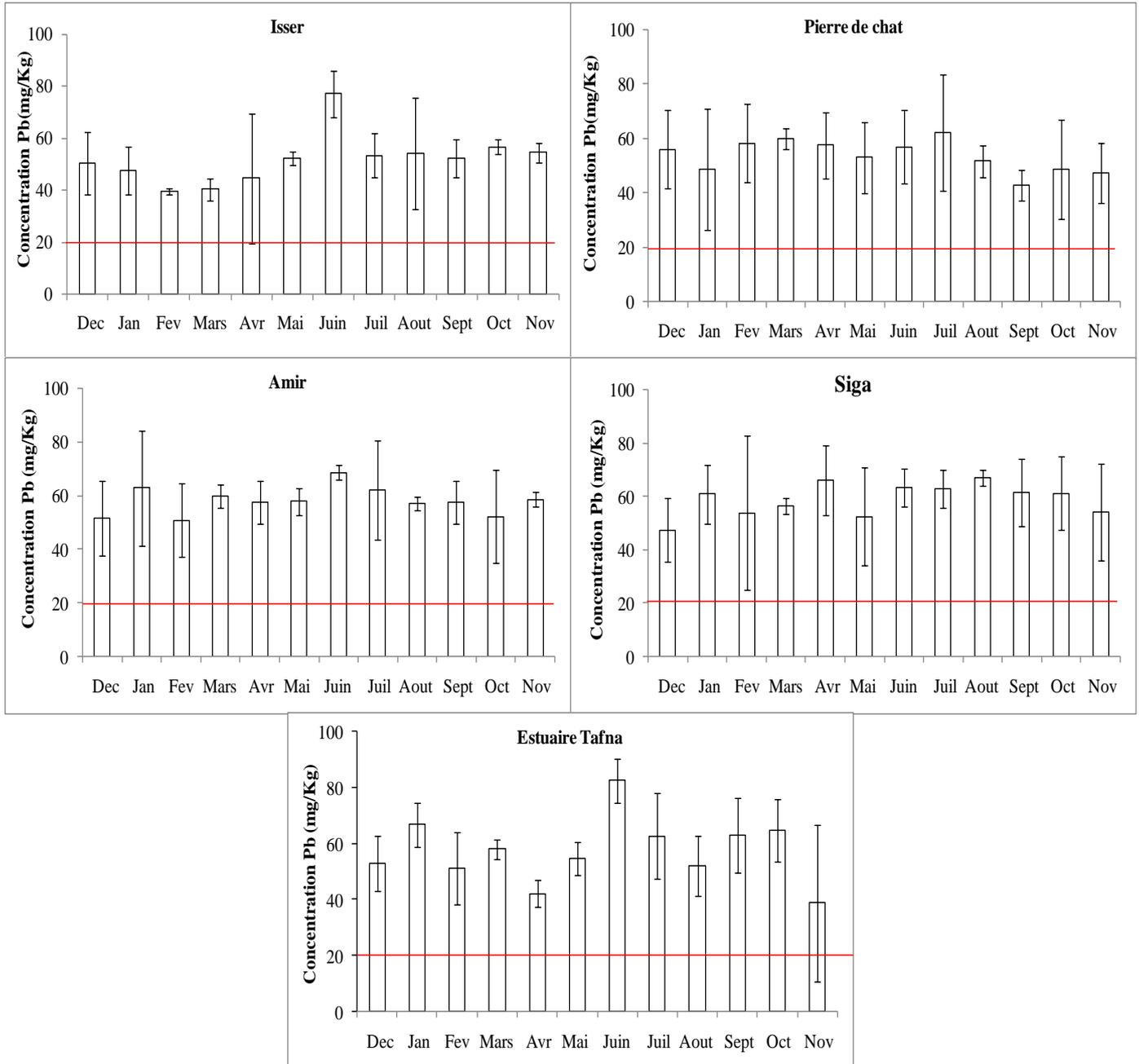


Figure IV.25 : Variations mensuelles des concentrations du plomb en mg/kg dans les sédiments

IV.3.2.1.6-Cadmium

Sur la figure IV.26, nous présentons les variations mensuelles des concentrations de cadmium en mg/kg dans les sédiments des cinq stations.

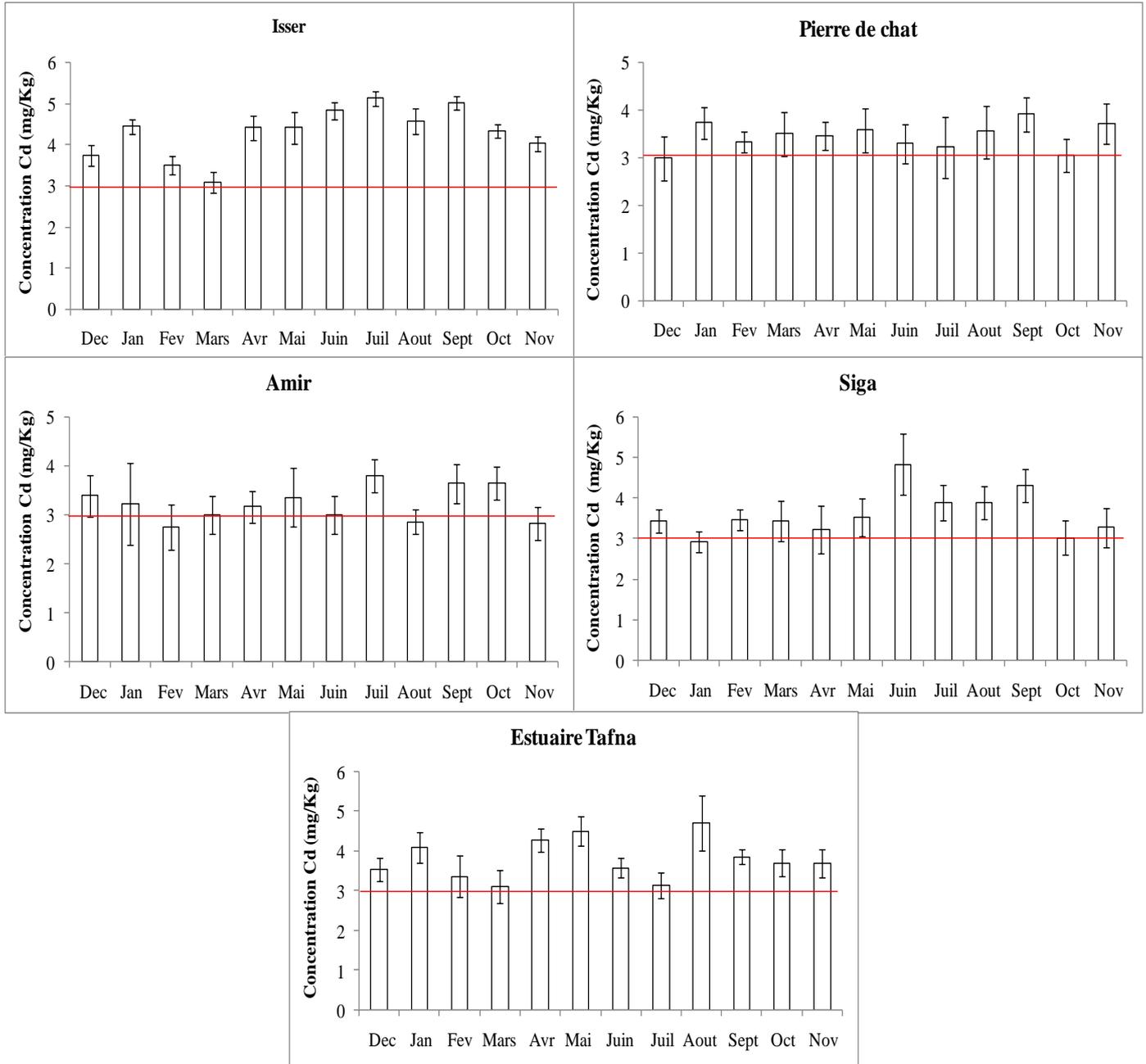


Figure IV.26 : Variations mensuelles des concentrations de cadmium en mg/kg dans les sédiments

Dans cette étude les teneurs en **fer** dans les sédiments varient entre un minimum de $29,72 \pm 1,25$ g/kg pendant le mois de juillet à la station de Isser et un maximum de $44,68 \pm 1,68$ g/kg pendant le mois d'août à la station d'Amir. Les teneurs en **fer** sont présents en quantités importantes, mais ne dépassent pas la valeur moyenne de référence (47 g/kg) selon **Turekian et Wedepohl, (1961)**.

Nous notons pour le **cuivre** une répartition temporelle régulière au niveau des cinq points étudiés. Les teneurs enregistrées en cuivre restent inférieures à la teneur de référence (45 mg/kg) **Turekian et Wedepohl, (1961)** avec une concentration minimale de $16,94 \pm 3,37$ mg/kg relevée à Isser pendant le mois de février et une concentration maximale de l'ordre de $34,72 \pm 4,59$ mg/kg pendant le mois d'Avril à Siga.

Les teneurs en **zinc** présentent un minimum de $110,28 \pm 7,28$ mg/kg à Siga durant le mois d'août et un maximum de $227,78 \pm 20,49$ mg/kg pendant le mois de Juin à Siga. Les teneurs dépassent la valeur de référence estimée à 95 mg/kg **Turekian et Wedepohl, (1961)** pour les cinq stations.

Les teneurs en **nickel** augmentent légèrement d'un mois à un autre avec un minimum de $20,56 \pm 4,28$ mg/kg à Siga pendant le mois d'avril jusqu'à atteindre un maximum pendant le mois de janvier $60,56 \pm 3,47$ mg/kg à l'estuaire de la Tafna. Dans l'ensemble toutes les teneurs en nickel sont en dessous de la valeur de référence (68 mg/kg). Les stations Isser et Pierre de chat ne présentent pas une grande différence entre les mois, contrairement pour Amir et Siga

Les résultats du suivi mensuel du **plomb** dans les sédiments superficiels montrent que les concentrations sont supérieures à la teneur de référence (20 mg/kg). Le minimum est de $39,44 \pm 1,27$ mg/kg pendant le mois de février à Isser. Ensuite les concentrations atteignent un maximum pendant le mois d'Août ($66,94 \pm 2,93$ mg/kg) à Siga.

La répartition du **cadmium** varie entre un minimum de $2,75 \pm 0,46$ mg/kg à Siga pendant le mois d'Août et un maximum de $5,14 \pm 0,17$ mg/kg pendant le mois de Juillet à Isser. Les valeurs montrent toujours un dépassement de la valeur de référence (3 mg/kg).

Pour le fer, le zinc et le nickel, l'étude de la variance à deux facteurs sans répétitions. ANOVA2, ne révèle aucune différence significative inter mois et inter station (p (lignes) et (p (colonnes) > 0,05). Par contre pour le plomb, elle révèle une différence hautement significative inter mois (p (colonnes)

IV.3.2.2 -Variations saisonnières

Sur la figure IV.27, nous présentons les variations saisonnières des teneurs métalliques moyennes contenues dans les sédiments de surface des cinq stations.

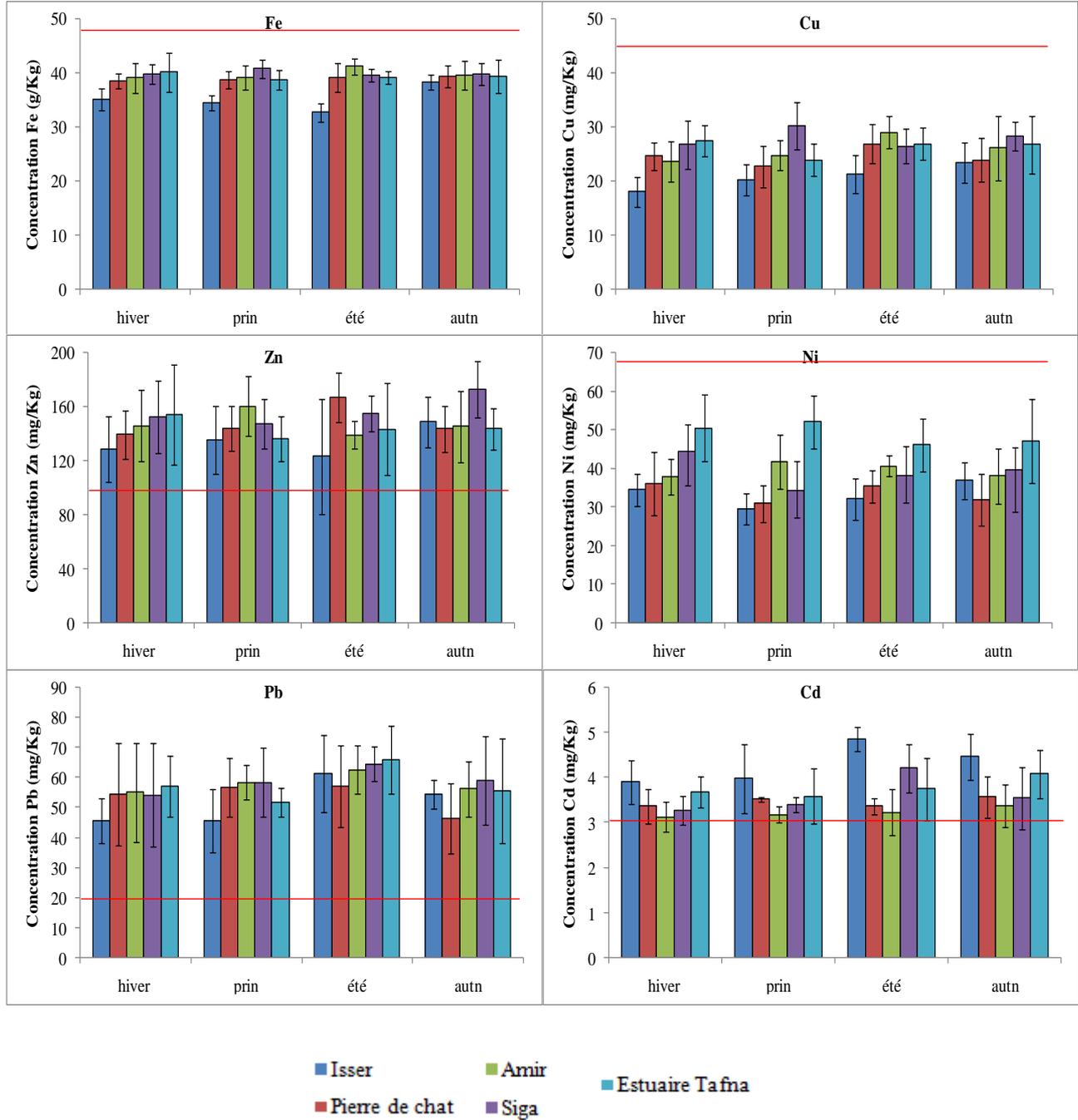


Figure IV.27: Variations saisonnières des teneurs métalliques (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) dans les sédiments

La variation saisonnière du **fer** montre une augmentation de l'amont vers l'aval pendant l'été, la valeur maximale $41,25 \pm 2,64$ g/kg est enregistrée à Amir et la valeur minimum $32,74 \pm 1,74$ g/kg à Isser. Cependant, toutes les valeurs ne dépassent pas de la valeur moyenne de référence (47g/kg) **Turekian et Wedepohl, (1961)**.

Les concentrations saisonnières du **cuivre** présentent un minimum à Isser ($18,06 \pm 2,78$ mg/kg) pendant l'hiver et un maximum à Siga ($30,19 \pm 4,36$ mg/kg) pendant le printemps.

Le **zinc** montre une augmentation de l'amont vers l'aval pendant l'hiver. Le minimum est enregistré à Isser ($123,33 \pm 12,35$ mg/kg) pendant l'été et le maximum est enregistré à Siga ($172,96 \pm 19,3$ mg/kg) pendant l'automne. Les concentrations de zinc dépassent la valeur moyenne de référence 95 mg/kg (**Turekian et Wedepohl, 1961**).

La variation saisonnière du **nickel** montre une augmentation de l'amont, avec un minimum à Isser pendant le printemps ($29,44 \pm 4,03$ mg/kg), vers l'aval avec un maximum à l'estuaire ($52,04 \pm 6,72$ mg/kg). Les concentrations en nickel restent toujours loin de la valeur de référence 68 mg/kg.

La concentration moyenne saisonnière du **plomb** varie d'une manière croissant de l'amont vers l'aval pendant l'hiver. Le maximum est $45,74 \pm 9,76$ mg/kg à Isser et le maximum est $65,83 \pm 5,71$ mg/kg à l'estuaire de la Tafna pendant l'été. Toutes les valeurs enregistrées pendant toutes les saisons dépassent la valeur de référence 20 mg/Kg (**Turekian et Wedepohl, 1961**).

Le **cadmium** enregistre une moyenne saisonnière minimale à Isser pendant hiver ($3,12 \pm 0,18$ mg/kg) et une moyenne saisonnière maximum à Isser pendant l'été ($4,85 \pm 0,28$ mg/kg). Les moyennes saisonnières dépassent la valeur de référence (3 mg/kg).

Pour le zinc et le nickel, l'étude de la variance à deux facteurs sans répétitions ANOVA 2, ne révèle aucune différence significative inter saison et inter station (p (lignes) et (p (colonnes) $> 0,05$). Par contre pour le cuivre, le fer et le cadmium, elle révèle une différence hautement significative inter stations. Pour plomb, elle révèle une différence significative entre les saisons.

IV.3.2.3 Variations Spatiales

La variation spatiale des métaux lourds (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, et Cd) est représentée sur la figure IV.28 suivante pour cinq points de prélèvements de Tafna.

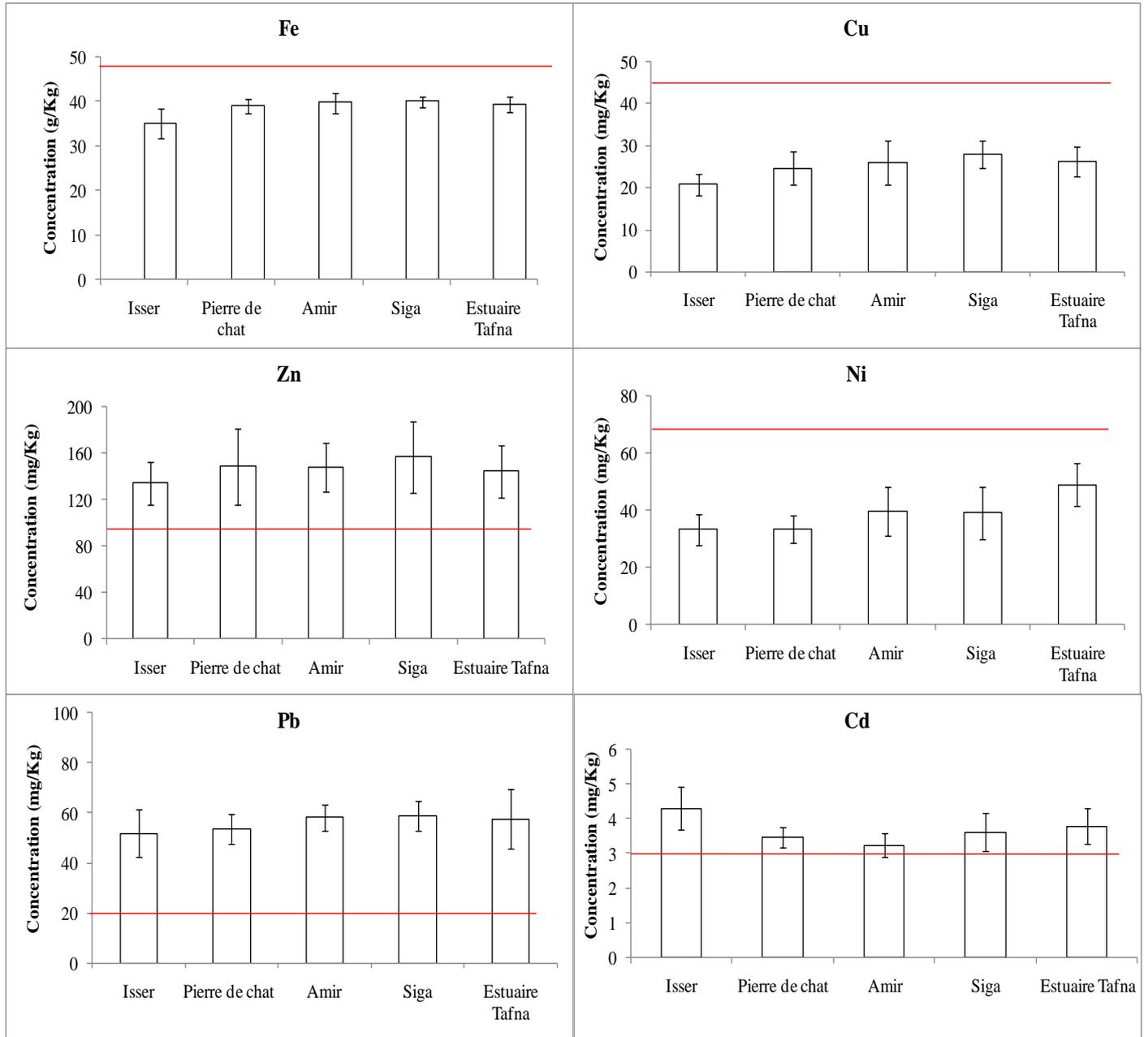


Figure IV.28: Variations spatiales des teneurs métalliques moyennes annuelles (Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) dans les sédiments

La variation spatiale des concentrations moyennes annuelles du **Fer** montre le minimum à Isser $35,14 \pm 3,35$ g/kg et le maximum à Siga $40,00 \pm 1,75$ g/kg. Les valeurs restent toujours au-dessous de la valeur de référence 47g/kg (**Turekian et Wedepohl, 1961**).

La valeur annuelle du **cuiivre** augment de Isser ; $20,97 \pm 2,52$ mg/kg, jusqu' à Siga $27,94 \pm 3,31$ mg/kg (le maximum). La moyenne annuelle ne dépasse pas la valeur de référence 45g/kg (**Turekian et Wedepohl, 1961**).

Le **zinc** présente une moyenne annuelle minimale à Isser $134 \pm 19,3$ mg/kg et une moyenne annuelle maximum de $156,92 \pm 13,5$ mg/kg à Siga. Nous constatons une pollution du zinc. Toutes les concentrations dépassent la norme 95 mg/kg (**Turekian et Wedepohl, 1961**).

Le **nickel** varie par ordre croissant de l'amant vers l'aval. Il est marqué par son minimum à Isser $33,26 \pm 5,36$ mg/kg et son maximum $48,94 \pm 7,58$ mg/kg à l'estuaire de la Tafna. Les valeurs restent toujours loin de la valeur moyenne de référence 68 mg/kg (**Turekian et Wedepohl, 1961**).

Pour la variation de la concentration moyenne du **plomb**, elle varie aussi par ordre croissant de Isser $51,81 \pm 9,68$ mg/kg jusqu'au atteindre le maximum à Siga avec la valeur $58,94 \pm 5,98$ mg/kg. Toutes les valeurs dépassent la norme 20 mg/kg (**Turekian et Wedepohl, 1961**).

Pour le **cadmium**, nous avons un minimum de 3,22 mg/kg à Amir et un maximum de 4,3mg/kg à Isser. Toutes les valeurs dépassent la valeur moyenne de référence 3mg/kg (**Turekian et Wedepohl, 1961**).

L'ANOVA utilisée pour analyser la variation spatiale pour les différents métaux montre que pour le fer, le zinc, le nickel, le plomb et le cadmium, il n'y a pas de différence significative entre les stations (p (lignes) $> 0,05$) mais il y a une différence hautement significative pour le cuiivre (p (lignes) = 0.0002).

IV.4 Calcul des indices

IV.4.1 Indice de géoaccumulation

En se basant sur la classification de Muller (1981), les calculs des indices de géoaccumulation ($I_{géo}$) sont donnés sur le tableau IV.2.

Tableau IV.2: Valeurs de l'indice de géoaccumulation des ETM dans les cinq stations

<i>I_{géo}</i>	Fe	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd
Isser	-1,00	-1,70	-0,09	-1,62	0,79	-0,07
Pierre du chat	-0,85	-1,46	0,06	-1,60	0,84	-0,38
Amir	-0,83	-1,38	0,05	-1,37	0,95	-0,48
Siga	-0,82	-1,27	0,14	-1,38	0,97	-0,32
Estuaire Tafna	-0,84	-1,36	0,02	-1,06	0,94	-0,25

L'indice de géoaccumulation des éléments traces métalliques, nous donne d'une manière empirique l'état de pollution des sédiments des cinq points étudiés.

- Isser : Sédiments modérément pollués en plomb, non pollués en fer cuivre zinc nickel et cadmium.
- Pierre du chat, Amir, Siga et l'estuaire : Sédiments modérément pollués en plomb et zinc, non pollués en fer, cuivre nickel, et cadmium.

IV.4.2 Facteur d'enrichissement

Les résultats obtenus pour le facteur d'enrichissement (FE) sont rassemblés sur le tableau IV.3. Il montre des valeurs plus ou moins importantes selon les points de prélèvements et les métaux.

Dans l'ensemble, le facteur d'enrichissement est compris entre 1 et 4 mais ne dépasse jamais 5, ce qui écarte le cas d'un enrichissement sévère.

Pour le cuivre, zinc, nickel et cadmium, les valeurs ne dépassent pas la valeur 2. Ceci montre que l'accumulation en ces métaux est relativement faible. En ce qui concerne le plomb, les résultats dépassent la valeur 3, donc l'enrichissement est Modéré. Cet enrichissement correspond probablement à des apports anthropiques (activités agricoles utilisant les fertilisants et engrais phosphatés, pollution automobile ...etc).

Tableau IV.3: Valeurs du facteur d'enrichissement dans les cinq stations

FE	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd
Isser	0,62	1,89	0,65	3,46	1,07
Pierre du chat	0,66	1,88	0,60	3,23	0,95
Amir	0,68	1,84	0,69	3,43	0,91
Siga	0,73	1,94	0,68	3,46	1,01
Estuaire Tafna	0,70	1,81	0,86	3,43	1,05

IV.4.3 Facteur et degrés de contamination

Les résultats des facteurs et degrés contamination par les métaux dans nos points d'études sont présentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4: Facteurs et degrés de contamination

Facteur de contamination	FC						DC
	Fe	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd	
Isser	0,75	0,46	1,41	0,49	2,59	1,43	7,13
Pierre du chat	0,83	0,55	1,56	0,49	2,68	1,15	7,26
Amir	0,85	0,58	1,55	0,58	2,90	1,07	7,53
Siga	0,85	0,62	1,65	0,57	2,95	1,20	7,85
Estuaire Tafna	0,84	0,58	1,52	0,72	2,88	1,26	7,80

Les FC pour Fe, Cu et Ni ne dépassent pas le seuil de la première classe ($FC < 1$) indiquant une contamination faible. Par contre le FE pour zinc, plomb, et cadmium dépassent le seuil. Cela signifie une contamination modérée.

Les cinq points de prélèvements ont presque le même degré de contamination ($DC = 7$) indiquant une contamination modérée.

IV.4.4 Indice de charge de pollution (PLI).

Les valeurs de PLI calculées pour chaque site sont également présentées sur le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Valeurs de L'indice de charge de pollution (PLI) associées à chaque station

Stations	FC						PLI
	Fe	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd	
Isser	0,75	0,46	1,41	0,49	2,59	1,43	0,98
Pierre du chat	0,83	0,55	1,56	0,49	2,68	1,15	1,01
Amir	0,85	0,58	1,55	0,58	2,90	1,07	1,05
Siga	0,85	0,62	1,65	0,57	2,95	1,20	1,10
Estuaire Tafna	0,84	0,58	1,52	0,72	2,88	1,26	1,12

Les valeurs de PLI sont faibles dans tous les échantillons étudiés et varient entre 1,01 et 1,12, indiquant et confirmant que les sédiments sont modérément pollués.

IV.4. 5 Indice de risque écologique potentiel (PER)

Les valeurs du coefficient de risque écologique E_r^i pour chaque élément et les indices de risque écologique (PER) associés à chaque point de prélèvement sont données sur le Tableau IV.6.

Tableau IV.6: Valeurs du coefficient de risque écologique E_r^i pour chaque élément et de l'indice de risque écologique (PER) associé à chaque station

Station	E_r						PER
	Fe	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd	
Isser	4,49	2,31	1,41	2,94	12,95	42,96	67,06
Pierre du chat	4,98	2,73	1,56	2,96	13,40	34,51	60,15
Amir	5,08	2,88	1,55	3,49	14,51	32,22	59,73
Siga	5,11	3,10	1,65	3,45	14,73	36,04	64,09
Estuaire Tafna	5,03	2,92	1,52	4,32	14,39	37,73	65,91

Compte tenu du risque écologique potentiel total, le risque écologique potentiel (**PER**) des métaux dans les sédiments en aval de oued Tafna est faible ($PER < 150$).

Le maximum est de 67,06 à la station d'Isser et le minimum est de 59,73 à la station Amir. Le Cd est le principal facteur potentiel de contribution au risque écologique pour les cinq sites.

IV.5 Traitement statistique des données

IV.5.1 Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) appliquée dans plusieurs études environnementales (**Derrag, 2014, Belhadj, 2018**) permet d'expliquer les différentes combinaisons entre les éléments métalliques analysés dans les sédiments. C'est pour cette raison qu'elle est largement utilisée afin d'évaluer les grandes tendances des données environnementales dans les milieux aquatiques (**Rubio, 2000**).

L'analyse en composantes principales (ACP) appliquée à l'ensemble des métaux lourds (fer, cuivre, zinc, nickel, plomb et cadmium) a permis de vérifier la discrimination des échantillons.

IV.5.1.1 ACP dans les sédiments et les eaux de surface

La figure IV.29 présente les plans factoriels de l'ACP calculées à partir des teneurs métalliques dans les eaux de surface et les sédiments de surface de oued Tafna.

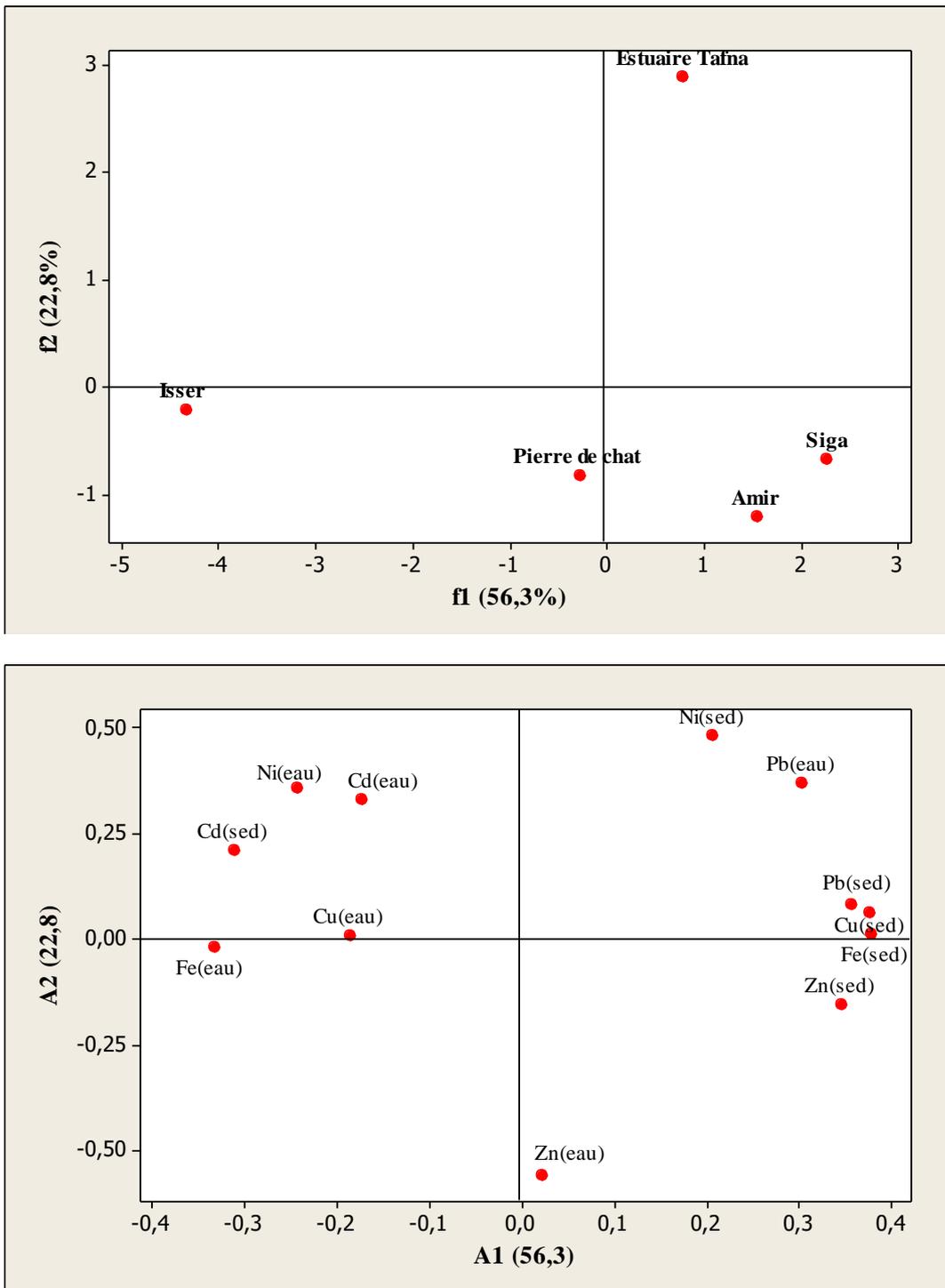


Figure IV.29: Plan factoriel engendré par les deux premiers axes de l'ACP calculés à partir des teneurs métalliques dans les eaux et les sédiments de surface des différents points de prélèvement

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de l'analyse en composante principale (ACP) sont présentés sur la figure IV.29. La matrice des données utilisées pour cette analyse est composée de douze colonnes correspondant aux différents métaux dans l'eau et les sédiments Cu(eau), Zn(eau), Ni(eau), Pb(eau), Cd(eau), Fe(sed), Cu(sed), Zn(sed), Ni(sed), Pb(sed) et Cd(sed) et de cinq lignes (Isser, Pierre du chat, Amir et Estuaire de la Tafna) relatives aux cinq stations retenues pour cette étude.

Les valeurs propres (6,76 et 2,73) ont permis de retenir deux inerties respectives 56,3 % et 22,8 %. Le plan de cette analyse totalise 79,1% de l'information.

Les contributions relatives des points colonnes qui construisent l'axe1 sont Fe(eau), Ni(sed), Pb(eau), Pb(sed), Cu(sed), Fe(sed) et Zn(sed), Zn(eau) sont de coordonnées positives et Ni(eau), Cd(eau), Cd(sed), Cu(eau), Fe(eau), sont de coordonnées négatives. Les points lignes qui construisent cet axe sont représentés par les stations Estuaire de la Tafna, Siga et Amir de coordonnées positives alors que les stations Isser et Pierre du chat sont de coordonnées négatives. Les concentrations les plus importantes du Fe(eau), Ni(sed), Pb(eau), Pb(sed), Cu(sed), Fe(sed), Zn(sed) et Zn(eau) sont enregistrées dans les points suivants : Estuaire de la Tafna, Siga et Amir. Elles contribuent à la définition de l'axe 1 du côté positif. Les teneurs en Ni(eau), Cd(eau), Cd(sed), Cu(eau), Fe(eau) sont importantes dans les stations Isser et Pierre du chat. Elles construisent l'axe1 du côté négatif.

Pour l'axe2, les points colonnes de coordonnées positives sont présentés par l'accumulation du Ni, Cd, Cu et Pb dans l'eau et les sédiments à l'opposé du reste des éléments métalliques qui sont de coordonnées négatives. Les points lignes qui construisent l'axe 2 sont Estuaire de la Tafna du côté positif et le reste des autres stations du côté négatif. Les teneurs en Ni, Cd Cu et Pb dans l'eau et les sédiments de l'estuaire de la Tafna sont importantes. Au fait, deux facteurs (axes), avec des charges différentes, signifient que deux contributions différentes sont impliquées dans la détermination des concentrations des éléments métalliques dans l'eau et les sédiments (**Benkaddour, 2018 et Belhadj, 2018**).

IV.5.1.2 ACP des paramètres physicochimiques

La Figure IV.30 présente les plans factoriels de l'ACP calculées à partir des paramètres physicochimiques dans les eaux de surface de oued Tafna.

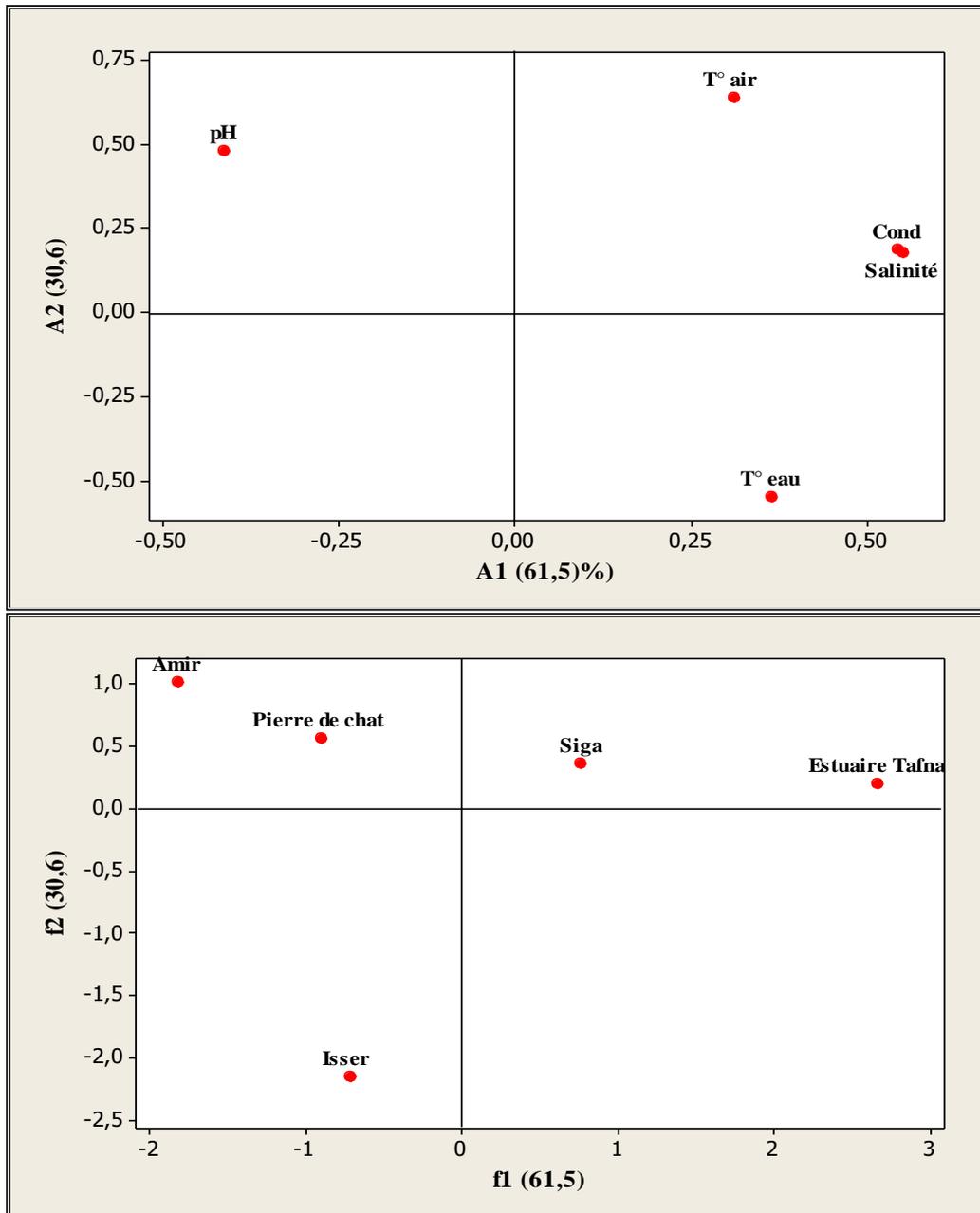


Figure IV.30: Plan factoriel engendré par les deux premiers axes de l'ACP calculés à partir paramètres physicochimiques dans les eaux de surface des différents points de prélèvement

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

La matrice des données utilisées pour cette analyse est composée de cinq colonnes correspondant aux paramètres physicochimiques dans les eaux de surface de oued Tafna la température de l'eau, température de l'air, conductivité, salinité et pH et de cinq lignes (Isser, Pierre du chat, Amir, Siga et Estuaire de la Tafna) relatives aux cinq stations retenues pour cette étude.

Les valeurs propres ont permis de retenir deux inerties respectives 61,5 % et 30,6 %. Le plan de cette analyse totalise 93,1% de l'information.

Les contributions relatives des points colonnes qui construisent l'axe1 sont la température de l'eau, température de l'air, conductivité, salinité sont de coordonnées positives et le pH est de coordonnées négatives. Les points lignes qui construisent cet axe sont représentés par les stations Estuaire de la Tafna et Siga de coordonnées positives alors que les stations Isser et Pierre du chat et Amir sont de coordonnées négatives. Les valeurs les plus importantes de la température de l'eau, température de l'air, conductivité, salinité sont enregistrées dans les points suivants : Estuaire de la Tafna et Siga. Elles contribuent à la définition de l'axe 1 du côté positif. Les teneurs en pH sont importantes dans les stations Isser, Pierre du chat et Amir. Elles construisent l'axe1 du côté négatif.

Pour l'axe2, les points colonnes de coordonnées positives sont présentés par la température de l'air, conductivité, salinité et pH dans l'eau et les sédiments à l'opposé de la température de l'eau qui a de coordonnées négatives. Les points lignes qui construisent l'axe 2 sont Estuaire Pierre du chat, Amir, Siga et Estuaire de la Tafna du côté positif et la station Isser du côté négatif. Les valeurs en température de l'air, conductivité, salinité et pH dans l'eau de l'estuaire de la Tafna, Siga, Amir et Pierre du chat sont importantes. Au fait, deux facteurs (axes), avec des charges différentes, signifient que deux contributions différentes sont impliquées dans la détermination paramètres physicochimiques dans l'eau de surface **(Lakhili, 2015; Djahadié, 2021)**.

IV.5.2 Classification ascendante hiérarchique CAH

IV.5.2.1 CAH des les sédiments et les eaux de surface

La figure IV.31 présente le dendrogramme issu de la classification des teneurs métalliques dans les eaux et les sédiments de surface des différents points de prélèvement.

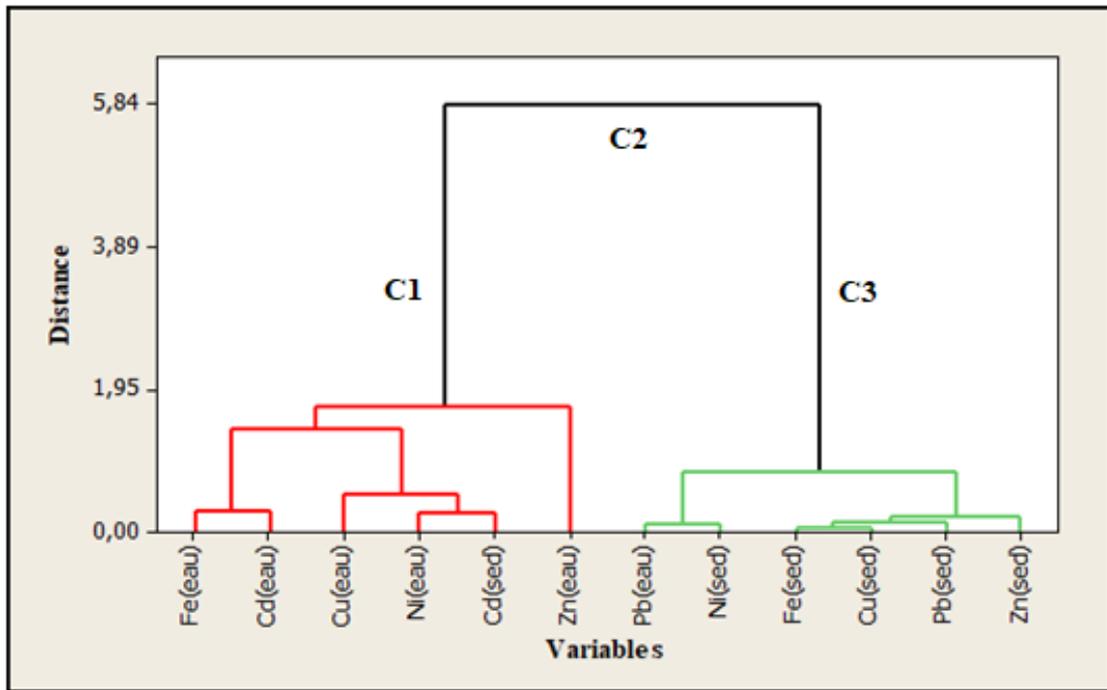


Figure IV.31: Dendrogramme des teneurs métalliques dans les eaux et les sédiments de surface des différents points de prélèvement

Les résultats de la classification ascendante hiérarchique (CAH) sont représentés sur la figure IV.31. La classification hiérarchique ascendante (CAH) réalisée à partir de la matrice constituée douze éléments (Fe(eau), Cu(eau), Zn(eau), Ni(eau), Pb(eau), Cd(eau), Fe(sed), Cu(sed), Zn(sed), Ni(sed), Pb(sed) et Cd(sed) Zn(eau), réparties sur cinq stations (Isser, Pierre du chat, Amir et Estuaire de la Tafna) met en évidence deux grands groupes composés d'un nombre de variables. Le premier groupe (C1) contient (Fe (eau), Cd(eau), Cu(eau), Ni(eau), Pb(eau), Cd(sed), (corrélés dans l'axe 2 dans ACP). Les teneurs moyennes de cet élément sont importantes dans les stations Isser et Pierre du chat. Le deuxième groupe (C2) contient Pb(eau), Ni(sed), Fe(sed), Cu(sed), Pb(sed) et Cd(sed) Zn(sed), (corrélés dans l'axe 1 dans ACP). Les teneurs moyennes de ces éléments sont plus importantes dans stations Amir, siga et l'estuaire. A une distance plus élevée, les deux groupes fusionnés forment le cluster (C3).

IV.5.2.2 CAH des Paramètres physicochimiques

La figure IV-32 présente le dendrogramme issu de la classification des paramètres physicochimiques dans les eaux de surface des cinq points de prélèvement de oued Tafna.

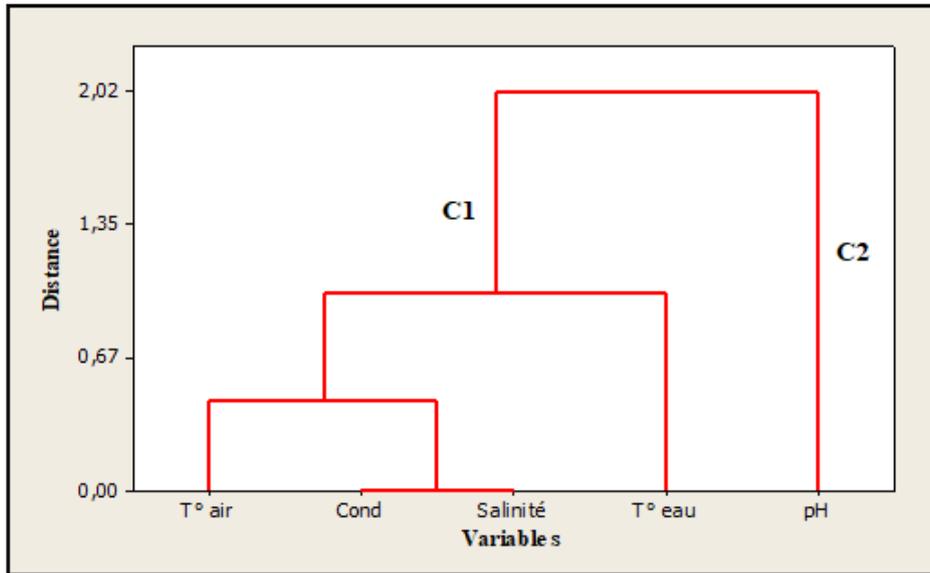


Figure IV.32:Dendrogramme des paramètres physicochimiques dans les eaux de surface des différents points de prélèvement

Les résultats de la classification ascendante hiérarchique (CAH) sont représentés sur la figure IV.30. La classification hiérarchique ascendante (CAH) réalisée à partir de la matrice constituée cinq éléments la température de l'eau, température de l'air, conductivité, salinité et pH, réparties sur cinq stations (Isser, Pierre du chat, Amir, Siga et estuaire de la Tafna) met en évidence deux groupes. Le premier groupe (C1) contient la température de l'air, conductivité, salinité et la température de l'eau, les teneurs moyennes sont importantes dans les stations Siga et estuaire de la Tafna. . Le deuxième groupe (C2) contient le pH. Il est plus important dans stations Amir et Pierre du chat. Les résultats de la classification ascendante hiérarchique (CAH), confirme les résultats de l'ACP.

IV.6 Etudes comparatives

L'étude comparative entre les concentrations métalliques dans l'eau de oued Tafna et la littérature est donnée sur le Tableau IV.7

Tableau IV.7: Etude comparative entre les concentrations métalliques dans l'eau de oued Tafna et la littérature

Localisation	Fe mg/l	Cu mg/l	Zn mg/l	Ni mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	Référence
Oued Tafna Algérie	0,006- 0,095	0,01-0,05	0,014-0,07	0,024- 0,092	0,09-0,48	0,001- 0,008	Cette étude
Oued Boufekrane Meknes, Maroc	0,006- 0,025	0,013- 0,046	0,002- 0,013	0,001- 0,005	-		Tahri, 2005.
Oued Hassar Maroc	0,002- 0,123	0,012- 0,036	0,034- 0,054	-	<0,004	0,022- 0,023	Fouad, 2014.
Le haut Tigre, Turquie	0,007- 0,388	0,001- 0,165	0,001- 0,037	0,058- 0,072	0,0002- 0,0003	Nd-0,0013	Varol., 2012.
Oued Saf-Saf Skikda, Algerie	0,007- 0,167	-	0,032- 0,072	0,057- 0,080	-	0,007- 0,016	Rouidi, 2022
Critères nationaux de qualité de l'eau recommandés	5*	0,013	0,120	0,470	0,065	0,002	EPA, 2004.

***Irrigation water guidelines soilfirst consulting.**

Sur le tableau IV-7, nous comparons les teneurs métalliques trouvées dans les eaux de surface dans notre zone d'étude avec la littérature. Les résultats ont révélé qu'il n'y a pas de pollution par le fer ou le nickel dans aucun de ces oueds. Les concentrations sont loin de la valeur limite selon Soil First Consulting (conformément aux directives sur l'eau d'irrigation) pour le fer et l'EPA pour le nickel. Le plomb a été trouvé à des concentrations plus élevées dans oued Tafna par rapport à la littérature.

D'autre part, le cuivre, le cadmium et le zinc sont présents à des concentrations variables dans tous les oueds. Les teneurs en cuivre en Turquie sont très élevées (0,001–0,165 mg/L), près de dix fois supérieure aux normes. Dans le cas du cadmium, il dépasse les concentrations standards de tous les sites présentés dans le tableau IV-7. Oued Hassar (Maroc) contient des

teneurs en cadmium très élevées, près de quatre-vingt-dix fois supérieure à celle des normes. De cette étude, il ressort donc que oued Tafna ne présente pas de pollution significative par rapport aux sites mentionnés sur le tableau IV-7.

Le tableau IV-8 présente une étude comparative entre les concentrations métalliques mesurées dans les sédiments de oued Tafna au cours de cette étude avec celles mesurées dans les sédiments superficiels prélevés dans d'autres oueds.

Tableau IV.8 : Etude comparatives des différentes concentrations des métaux dans les sédiments oued Tafna et la littérature et les valeurs de fond (**Turekian et Wedepohl 1961**)

Localisation	Fe (g/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Référence
Oued Tafna	29.72-	16.94-	110.28-	20.56 -	39.44 -	2.75-5.14	Cette étude
Algérie	44.68	34.72	227.78	60.56	66.94		
Oued Beni-Mellal	15.67 -	32.69-	49.84-	/	72.93-	0.67-6.27	Barakat, 2012
maroc	36.01	740.75	149.19		140.36		
Oued Siliana-	9.48-	6-29	57.6-	/	36-182	0.1-1	Mseddi, 2014
Tunisie	21.11		314.3				
Bouhamra,	24,1-	/	90,0-	20,1-	38,7-45,2	0,4-2,6	Khaled-Khodja, 2016
Algérie	33,7		186,0	26,7			
Oued Seybouse	0,67	3,66	113,5	1,5	145,15	/	Louhi, 2012
Algerie	2,295	145,1	702,10	15,6	476,31		
Turekian et	47	45	95	68	20	3	Turekian et Wedepohl.,
Wedepohl.							

Les teneurs en zinc dans oued Tafna dépassent celles trouvées dans la littérature. Les teneurs en Cd et Pb dans zone d'étude sont plus élevées par rapport à celles trouvées au Maroc et en Tunisie et dépassent les normes selon **Turekian et Wedepohl(1961)**. Pour le reste des métaux les teneurs ne présentent pas de danger.

CONCLUSION

Le présent travail permet d'actualiser la banque des données sur la qualité des eaux et des sédiments du bassin versant de la Tafna. Le choix a été porté sur la partie aval de oued Tafna, puisque ses eaux sont très utilisées pour l'irrigation.

Nous nous sommes intéressés dans notre étude à l'évaluation du degré de contamination dans les eaux de surface et les sédiments par six métaux lourds : le cadmium, le cuivre, le plomb, le fer, le zinc et le nickel au niveau de la partie aval d'oued Tafna.

Les résultats de l'analyse physicochimique de l'eau nous ont permis de mieux cerner les caractéristiques environnementales de notre site d'étude. Le pH de l'eau basique est très influencé par la température, par la nature des sédiments dominés, par les terrains calcaires et argileux. Dans l'ensemble, la superposition de la distribution spatio-temporelle de la température de l'eau et l'air avec celle du pH de la conductivité et la salinité montre un profil qui témoigne de l'interdépendance de ces paramètres entre eux.

Les eaux des cinq points de prélèvement ont révélé une pollution métallique principalement par cuivre, ainsi par le Pb ou toutes les concentrations dépassent la valeur de référence de **(EPA, 2004)**.

La pollution par le cadmium est également importante. Les résultats indiquent une forte concentration de cet élément pour toute la période d'étude et dans les cinq points de prélèvement. Ceci est particulièrement préoccupant en raison pour l'environnement et la santé. Par contre les concentrations moyennes de fer, nickel et le zinc mesurées ne dépassent pas la valeur de référence tout au long de la période d'étude.

De manière générale, nous constatons que plusieurs de ces métaux atteignent des maximums pendant le mois d'août (la saison sèche).

L'évaluation de la teneur métallique en utilisant le facteur et le degré de contamination (FC, DC) montre que les eaux de surface de l'oued Tafna sont modérément contaminées par le cuivre et le cadmium, et considérablement contaminé par plomb.

CONCLUSION

Le processus d'accumulation du plomb, du cadmium et du zinc, dans les sédiments est très important ou les résultats de notre étude indiquent que toutes ces concentrations dépassent largement les valeurs de référence selon **Turekian and Wedepohl (1961)**.

L'évaluation de la qualité des sédiments a été effectuée aussi par le calcul de divers indices comme l'indice de géoaccumulation (**I_{géo}**), les valeurs montrent que les sédiments étaient non contaminés à modérément contaminés par le Zn et le Pb (classe 1).

Les valeurs moyennes des facteurs d'enrichissement(**FE**) de Pb, Zn et Cd indiquent une pollution métallique considérable, contrairement pour Cu et Ni, où les valeurs moyennes des facteurs d'enrichissement sont inférieures à 1.

Le facteur de contamination (**FC**) montre de faibles niveaux de contamination en Fe Cu et Ni ($FC < 1$) et une contamination modérée en Zn Pb et Cd ($FC > 1$).

L'indice de charge de pollution (**PLI**) et l'indice de risque écologique potentiel (**PER**), confirment les résultats précédents.

L'étude de la variance à deux facteurs sans répétitions ANOVA 2 appliquée pour tous les paramètres physicochimiques ne révèle aucune différence significative inter mois et inter stations. Pour la conductivité, l'ANOVA 2 montre une différence hautement significative inter stations (p (colonnes) = 0,0002). Pour le zinc et fer, il y a des différences significatives à hautement significatives inter station (p (colonne) > 0,0005) et pour le plomb, elle révèle une différence hautement significative inter mois (p (colonnes) < 0,0005) et une différence significative entre les saisons.

L'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) ont été appliquées aux paramètres physicochimiques et à l'ensemble des métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Fe, Zn et Ni) dans les eaux de surface et les sédiments. Les résultats montrent que les teneurs en Ni, Cd, Cu et Pb sont importantes dans l'estuaire de la Tafna. L'ACP appliquée aux paramètres physicochimiques montre aussi que les valeurs de la

CONCLUSION

température de l'eau et de l'air, de la conductivité et de la salinité sont importantes à Siga et à l'estuaire de la Tafna, ce qui est confirmée par les résultats de CAH.

Cette étude a permis également de faire des recommandations pour des perspectives futures.

Enquêter sur les sources de pollution et trouver des moyens de l'éliminer ou de réduire son pourcentage.

Etendre ce travail à d'autres polluants et à d'autres cours d'eaux de l'ouest algérien.

Etablir un logiciel pour l'aménagement du territoire et de la gestion des ressources des bassins versants pour lutter contre les rejets domestiques et industrielles directs.

BIBLIOGRAPHIE

- Abderrazzak, B. A., & Fethi, B.,** 2021. Evaluation of the Bioavailability of Heavy Metals by Saline, EDTA and HCL Solutions in Agricultural Soil. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 17, 1290-1298.
- Adjagodo A,** Kelomè NC, Vissin EW., 2017. Pollution Physique Et Bactériologique De L'eau Du Fleuve Dans La Basse Vallée De L'ouémé Pendant Les Périodes De Basses Et Hautes Eaux Au Bénin. *EuropeanScientific Journal*, ESJ.;13.
- Adriano, D. C.,** 2001. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals (Vol. 860). New York: Springer.
- Alloway, B. J.,** 1995. Soil processes and the behaviour of metals. *Heavy metals in soils*, 13, 3488.
- Alloway, B.J.** et Ayres, D.C., 1997. *Chemical Principles of Environmental Pollution*. Blackie Academic and Profesional, an imprint of Chapman and Hall, London, 394 pp Atmospheric Environment 36, 1077-1086.
- Baize, D.,** 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Ed., Paris, 410 pp.
- Bakreti A.,** 2014 : « Modélisation Hydrologique Du Bassin De La Tafna », Thèse de doctorat en Science, Université d'Oran, Es Sénia, Département des Sciences de la Terre.
- Banks, J.L,** Ross, D.J, Keough, M.J, Eyre, B.D, Macleod, C.K., 2012. Measuring hypoxia induced metal release from highly contaminated estuarine sediments during a 40 day laboratory incubation experiment. *Science of the Total Environment* 420, 229-237
- Barakat, A.,** El Baghdadi, M., Rais, J., &Nadem, S., 2012. Assessment of heavy metal in surface sediments of Day River at Beni-Mellal region, Morocco. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 4(8), 797-806.
- Barnabé, G.,** 1991 : Bases biologiques et écologiques de l'aquaculture. Edition Lavoisier-Tec.
- Belhadj, H.,** 2018 Evaluation de la pollution métallique dans l'eau, les sédiments et organismes vivants du littoral de ghazaouet (extrême Ouest Algérien). Thèse de doctorat. Tlemcen, Université Abou Bekr Belkaïd. Faculté des Science.
- Bellair, J. T.,** Parr-Smith, G. A., & Wallis, I. G., 1977. Significance of diurnal variations in fecal coliform die-off rates in the design of ocean outfalls. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 2022-2030.
- Bemoussat A.,** 2012 : « Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin de la Tafna», Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, Département d'hydraulique.
- Benabdelkader, A.,** Taleb, A., Probst, J. L., Belaidi, N., &Probst, A., 2018. Anthropogenic contribution and influencing factors on metal features in fluvial sediments from a semi-arid

- Mediterranean river basin (Tafna River, Algeria): A multi-indices approach. *Science of the Total Environment*, 626, 899-914.
- Benabdelkader, A.**, Taleb, A., Probst, J.L., Belaidi, N., Probst, A., 2019. Origin, distribution, and behaviour of rare earth elements in river bed sediments from a carbonate semi-arid basin (Tafna River, Algeria). *Applied Geochemistry*. 106, 96-111.
- Benhaddya Mohammed Lamine.**, 2014. Gestion et traitement de la pollution au niveau de la zone industrielle HASSI MESSAOUD, Thèse Doctorat En Sciences, Université usto-MB
- Benkaddour, B.**, 2018. Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Chélif (Algérie). 2018. Thèse de doctorat. Perpignan.
- Briefert. C** et Perraud. R., 2001. Chimie de l'environnement. Air, eau, sols, déchets. De Boeck Université, Paris, Bruxelles, 1 re édition.
- Boucheseiche C.**, Cremille E., Pelte T., Pojer K., 2002 : Bassin Rhône Méditerranée – Corse. Guide technique n°7, Pollution toxique et écotoxicologie : notion de base. Lyon, Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée - Corse, 83 p.
- Boutin C.**, 1987. L'eau des nappes phréatiques superficielles, une richesse naturelle vitale mais vulnérable. L'exemple des zones rurales du Maroc. *Sciences de l'eau* 6:357–365.
- BRGM.**, 2003, Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Mécanismes de transfert des produits phytosanitaires du sol vers les nappes et les méthodes d'analyse des produits phytosanitaires dans les eaux, Rapport final BRGM/RP51590-FR.
- Cammack WK**, Kalff J, Prairie YT, et al., 2004 Fluorescent dissolved organic matter in lakes: relationships with heterotrophic metabolism. *Limnology and Oceanography*.; 49:2034–2045.
- chimiques. *Annales de limnologie*. 6(2): 161-190.
- Coble PG.**, 1996. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. *Marine chemistry*.; 51:325–346.
- Collignon B.**, 1986. Hydrogéologie appliquée à des aquifères karstiques des monts de
- Copat, C.**, Bella, F., Castaing, M., Fallico, R., Sciacca, S., Ferrante, M., 2012. Heavy metals concentrations in fish from Sicily (Mediterranean sea) and evaluation of possible health risks to consumers. *Environmental Contamination and Toxicology*. 88, 78–83.
- Cowart JB**, Burnett WC., 1994. The distribution of uranium and thorium decay-series radio nuclides in the environment; A review. *J Environ Qual* 23: 651-662.
- Cui J**, Zang S, Zhai D, et al., 2014 Potential ecological risk of heavy metals and metalloid in the sediments of Wuyuer river basin, Heilongjiang province, China. *Ecotoxicology*.; 589– 600.
- Dahri, N.**, Atoui, A., Ellouze, M., & Abida, H., 2018. Assessment of streambed sediment contamination by heavy metals: The case of the Gabes Catchment, South-eastern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*. 140, 29-41.

- Dali-Youcef, N.,** Ouddane, B., & Derriche, Z., 2006. Adsorption of zinc on natural sediment of Tafna River (Algeria). *Journal of hazardous materials*, 137(3), 1263-1270.
- Dali-youcef n,** Ouddane b and Derriche z., 2005- Metal found in superficial sediment of Tafna river and its estuary in North- Western Algeria. *Fresenius Environmental Bulletin*. Vol 14- N°9: 753-763.
- Dali-Youcef, N.,** Ouddane, B., & Derriche, Z., 2004. Metal partitioning in calcareous sediment of the Tafna River and its estuary (Algeria). *Fresenius Environmental Bulletin*, 13(12), 1500-1508.
- Dali-Youcef, N.,** 2005. Contribution a l'étude des polluants métalliques dans les sédiments d'oued Tafna (Ouest Algérien), thèse doctorat, université de Tlemcen (Algérie).
- Dassenakis, M.,** Andrianos, H., Depiazi, G., Konstantas, A., Karabela, M., Sakellari, A., & Scoullou, M., 2003. The use of various methods for the study of metal pollution in marine sediments, the case of Euvoikos Gulf, Greece. *Applied Geochemistry*, 18(6), 781-794.
- Delval, C.,** 1984. Réactions du flet vis à vis des pollutions par les métaux (Cu, Zn, Cd et Pb) sur le littoral de la mer du Nord: détoxification, métallothionéines (Doctoral dissertation).
- De Villers Juliette,** Squilbin M, Y. C., 2005. Fiche les données de l'IBGE : « L'eau à Bruxelles » Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement. 2, 3-4.
- Denison F.,** 2004. Uranium (VI) speciation: modelling, uncertainty and relevance to bioavailability models - Application to uranium uptake by the gills of a freshwater bivalve, Thèse de Doctorat Université de Provence Aix - Marseille I; France, 338 p.
- Derrag, Z.,** 2014. Contribution à l'étude des polluants métalliques dans les sédiments et chez les poissons des barrages de Sikkak (Ain Youcef) et de El Izdihar (Sidi Abdelli) de la Wilaya de Tlemcen. thèse doctorat, université de Tlemcen (Algérie).
- Duquesne, S.,** 1992. Bioaccumulation métallique et métallothionéines chez trois espèces de poissons provenant du littoral Nord-Pas-De-Calais (Doctoral dissertation, Lille 1).
- Djahadi, S. D.,** Sandao, I., Ahmed, Y., Harouna, M., & Ousmane, B., 2021. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du socle du bassin versant de Goroubi dans la commune de Torodi/Liptako nigérien. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(6), 2715-2729.
- Derwich E.,** Beziane Z., Benaabidate L, Belghyti D., 2008. Evaluation de la qualité des eaux de surface des oueds Fès et Sebou utilisés en agriculture maraîchère au Maroc, *Larhyss Journal* ISSN 1112-3680, n°7 : pp.59-77
- Devallois, V.,** 2009. Transferts et mobilité des éléments traces métalliques dans la colonne sédimentaire des hydro systèmes continentaux (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 1).
- Di Palma, L.,** & Mecozzi, R., 2007. Heavy metals mobilization from harbour sediments using

- EDTA and citric acid as chelating agents. *Journal of hazardous materials*, 147(3), 768-775.
- Diaz R.J.**, 2001. Overview of hypoxia around the world. *Journal of environmental quality*. 2001;30:275–281. Discussion et propositions des classes en tant que base d'interprétation des analyses.
- Djediai H.**, 2014. Etude de la qualité des eaux du bassin versant de la Tafna et une approche théorique de la dégradation du méthyle Parathion , thèse doctorat , université USTO MB.
- Dufour P**, Slepoukha M., 1975. l'Oxygène dissous en lagune Ebrié: influences de l'hydroclimat et des pollutions. *Documents Scientifiques, Centre de Recherches Océanographiques, Abidjan*. 1975;6:75–118.
- Duinker J. C.**, Nolting R. F., Michel D., 1982. Effects of salinity, pH and redox conditions.
- Eggleton J.** Et Thomas, K.V., 2004. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International*; 30: 973-980.
- El Asslouj J.**, Kholtei S., El Amrani-Paaza N., Hilali A., 2007. Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 20, n°3: 309-321. elements onPM2.5 particulate matter over the New York-New Jersey harbor estuary.
- Emberger L.**, 1955. Une classification biologique des climats. *Rev. Trav. lab. Bot. Et Zool*.
- Ennouri, R.**, Chouba, L., Magni, P., Kraiem, M.M., 2010. Spatial distribution of trace metals (Cd, Pb, Hg, Cu, Zn, Fe and Mn) and oligo-elements (Mg, Ca, Na and K) in surface sediments of the Gulf of Tunis (Northern Tunisia). *Environmental Monitoring and Assessment*. 163, 229–239. *Fac. Sci. Montpellier, série Bot, Vol7: p 3-43*
- EPA ,2004.** United States Environmental Protection Agency.
- Falissard, B.**, & Bruno, F., 1998. Are there borderline states in the child .*L'encephale*,24,23.
- Forstner U.**,Aslf W., Calmano W., Kersten M., Salomons W.,1986. Mobility of heavy metals in degred harbor sediments. In *Sediments and Water interactions, Sly-Peter- Ged., Springer- Verlag New York , United States*, 371-380.
- Förstner, U.**, Ahlf, W., &Calmano, W., 1989. Studies on the transfer of heavy metals between sedimentary phases with a multi-chamber device: combined effects of salinity and redox variation. *Marine Chemistry*, 28(1-3), 145-158.
- Förstner U, Wittmann GTW** (eds) ., 1981 *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Förstner, U.**,Calmano, W., Schoer, J., 1982. Metals in sediments from the Elbe, Wisser and Ems estuaries and from the German Bight: grain size effects and Chemical forms. *Thalassia Jugosl* 12:30-36.
- Foster I. D. L.** et Charlesworth S. M., 1996. Heavy metals in the hydrological cycle: trends and

explanation. *Hydrological Processes*; 10: 227-261.

Fouad S., 2013. Qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de l'oued hassar : impacts des eaux usées de la localité de medi-ouna (PERIURBAIN DE CASABLANCA, MAROC).

Fu, C., Guo, J., Pan, J., Qi, J., & Zhou, W., 2009. Potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in sediments of the Yangtze River within the Wanzhou section, China. *Biological trace element research*, 129(1), 270-277.

Gao, Y., Nelson, E. D., Field, M. P., Ding, Q., Li, H., Sherrell, R. M., & Eisenreich, S. J., 2002. Characterization of atmospheric trace elements on PM_{2.5} particulate matter over the New York–New Jersey harbor estuary. *Atmospheric Environment*, 36(6), 1077-1086.

Ghenim A. et Megnounif A., 2013 : « Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest .Algérie) », *Physio-Géo journal*, Volume 7.

Gueguen, G., 2001. Environnement et management stratégique des PME: le cas du secteur Internet. Doctorat en sciences de gestion. Université Montpellier.

Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, 14(8), 975-1001.

Hynes TP., 1990. The impacts of the Cluff Lake uranium mine and mill effluents of northern Saskatchewan: M.Sc. thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, 214p.

Inal; A., Boulahdid, M., Angelleti, B., Radakovitch, O., 2018. Levels and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments offishing grounds along Algerian coast. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 322–33

Ineris., 2003. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. Disponible sur www.ineris.fr.

Kalle, K., 1963. Über das Verhalten und die Herkunft der in den Gewässern und in der Atmosphäre vorhandenen himmelblauen Fluoreszenz. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 16(4), 153-166.

Khaled-Khodja, S., & Durand, G., 2016. Contamination métallique de l'eau et du sédiment d'Oued Bouhamra. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 32, 135-146.

Kouidri, M., Dali-youcef, N., Benabdellah, I., Ghouali, R., Bernoussi, A., Lagha, A., 2016. Enrichment and geoaccumulation of heavy metals and risk assessment of sediments from coast of AinTemouchent (Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*. 9-354.

Lakhili, F., Mohammed, Benabdelhadi, Nouzha, Bouderkha, et al., 2015. Etude de la qualité physicochimique et de la contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Beht (Maroc). *European Scientific Journal*, vol. 11, no 11.

- Lick, W.**, 1982. Entrainment, deposition, and transport of fine-grained sediments in lakes. In *Sediment/Freshwater Interaction* (pp. 31-40). Springer, Dordrecht.
- Louhi, A.**, Hammadi, Atika, ET Achouri., 2012. Mabrouka. Determination of some heavy metal pollutants in sediments of the Seybouse River in Annaba, Algeria. *Air, Soil and Water Research*, , vol. 5, p. ASWR. S10081.
- Les données de l'IBGE.**, 2005 "L'eau à Bruxelles" Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement.
- Leynaud G.**, 1968. Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique.
- Li, Y.**, Wang, X., Huang, G., Zhang,B., Guo,S., 2009. Adsorption of CuandZnontoMn/Fe oxides and organic materials in the extractable fractions of river surficial sediments. *Soil.Sediment.Contam.*18,87–101
- Loring, D. H.**, & Rantala, R. T., 1992. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth-science reviews*, 32(4), 235-283.
- Lounnas A.**, 2009 Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station HamadiKroma de Skikda. Mémoire de Magister, Université de Skikda (Algérie), 120 p.
- Maanan M.**, Saddik M, Maanan M, et al., 2015. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco. *Ecological Indicators.*;48:616– 626
- Mami A.** et Yebdri D., 2015 : La disponibilité en eau superficielle dans le bassin versant de l'oued Mouillah (Nord-Ouest de l'Algérie), *International journal of scientific research and Engineering Technology (IJSET)*, Volume 4, PP 195-198.
- Martinci, D.**, Kwokal, Z., Branica, M., 1990. Distribution of zinc, lead, cadmium and copper between different size fractions of sediments I. The LimskiKanal (North Adriatic Sea). *Sci Total Environ.* 95, 201–215.
- Meybeck, M.**, Lestel, L., Bonté, P., Moilleron, R., Colin, J. L., Rousselot, O., ... & Thévenot, D. R., 2007. Historical perspective of heavy metals contamination (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) in the Seine River basin (France) following a DPSIR approach (1950–2005). *Science of the Total Environment*, 375(1-3), 204-231.
- Miquel, G.**, 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix Scientifiques et Technologiques.
- Mmolawa, A.** Likuku and G. Gaboutloeloe., 2011. "Assessment of Heavy Metal Pollution in Soils along Roadside Areas in Botswana," *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 5, No. 3, 2011, pp. 186- 196.
- Morillo, J.**, Usero, J., & Gracia, I., 2004. Heavy metal distribution in marine sediments from the southwest coast of Spain. *Chemosphere*, 55(3), 431-442.

- Mseddi, H.**, Mammou, A. B., 2014. Évaluation de la contamination des sédiments des oueds Rémir et Siliana par les rejets miniers d'El Akhouat (Bassin versant de Siliana, Nord-Ouest de la Tunisie). *Geo-Eco-Trop*, 38(2), 305-316.
- Muller, G.**, 1981. Schwer metal lbelastung der sedimente des neckars und seiner nebenflusse: Eine estandsaufnahme., 1981; 105: 157–164.
- Nehme, N.**, 2014. Evaluation de la qualité de l'eau du bassin inférieur de la rivière du Litani, Liban : approche environnementale, Ecole Doctorale RP2E Université de Lorraine.
- Nakhle, K.**, 2003. Le mercure, le cadmium et le plomb dans les eaux littorales libanaises: apports et suivi au moyen de bioindicateurs quantitatifs (éponges, bivalves et gastéropodes) (Doctoral dissertation, Université Paris 7).
- Nisbet.M Et VerneauxJ.**, 1970. Composantes chimiques des eaux courantes. on the behaviour of Cd, Zn, Ni and Mn in the ScheldtEstuary. *ThalassiaJugosl*. 18.
- Ongley, E. D.**, Bynoe, M. C., & Percival, J. B., 1982. Physical and geochemical characteristics of suspended solids, Wilton Creek, Ontario. In *Sediment/freshwater interaction* (pp. 41-57). Springer, Dordrecht.
- Palanques, A.**, Masqué, P., Puig, P., Sanchez-Cabeza, J. A., Frignani, M., & Alvisi, F., 2008. Anthropogenic trace metals in the sedimentary record of the Llobregat continental shelf and adjacent Foix Submarine Canyon (northwestern Mediterranean). *Marine Geology*, 248(3-4), 213-227.
- Power, E. A.**, & Chapman, P. M., 2018. Assessing sediment quality. In *Sediment toxicity assessment* (pp. 1-18). CRC Press.
- Quevauviller, P.**, Rauret, G., López-Sánchez, J. F., Rubio, R., Ure, A., & Muntau, H ., 1997. Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure. *Science of the Total Environment*, 205(2-3), 223-234.
- Radakovitch, O.**, Roussiez, V., Olivier, P., Ludwig, W., Grenz, C., Probst, J.L., 2008. Inputs of particulate heavy metals from rivers and associated sedimentary deposits on the Gulf of Lion continental shelf. *Estuarine Costal and Shelf Science*. 77, 285–295.
- Ramade, F.**, 1997. La conservation des écosystèmes méditerranéens. *Aménagement et Nature*.
- Rouidi, S**, Hadjem, Amer, Asia., 2013. Laurence, et al. Sources and distribution of hydrocarbons in surface sediments of saf-saf oued (Skikda city, northeastern Algeria). *Annals of Biological Research*, vol. 4, no 4, p. 61-69.
- Pnue. 1991.** Pollution des eaux douces. Bibliothèque de l'environnement PNUE/GEMS. N° 6. Nairobi.
- Ragnarsdottir KV et Charlet L.**, 2000. Uranium behaviour in natural environments, in *Mineral*

society of Great Britain & Ireland, ed., Environmental mineralogy : Microbial interactions, anthropogenic influences. Contaminated land and waste management, p 333-377.

Ramousse, R., & Le Berre, M., 1995. Pour un projet de charte de réintroduction de la Marmotte Alpine en France. Laboratoire de Socioécologie et Conservation. International Marmot Network, Villeurbanne, 81-88.

Regoli F, Nigro M, Orlando E., 1998- Lysosomal and antioxydant reponses to -metals in the Antarticscallop *Adamusium Colbecki*. Aquatic toxicology: 375-378 p.

Reoyo-Prats, B., Aubert, D., Menniti D., Ludwig, W., Sola, J., Pujo-Pay, M., Conan, P., Verneau, O., Palacios, C., 2017. Multicontamination phenomena occur more often than expected in Mediterranean coastal watercourses: Study case of the Têt River (France). Science of the Total Environment. 579, 10–21.

Ribera D, Labrot F, Tisnerat G., 1996. Uranium in the environment: occurrence, transfer, and biological effects. Reviews in EnvironmentalContamintaion and Toxicology; 146: 53-89.

Rodier J., 1996. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Paris :Dunod: 8e edition.

Roussiez, V., Ludwig, W., Radakovitch, O., Probst, J.L., Monaco, A., Charriere, B., Buscail, R., 2011. Fate of metals in coastal sediments of a Mediterranean flood-dominated system: an approach based on total and labile fractions. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 92, 486-495.

Rubio B, Nombela MA, Vilas F., 2000. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution. Marine pollution bulletin.;40:968–980.

Salomons W. et Förstner, U., 1984. Metals in the hydrocycle. Berlin, New-York, Springer Verlag.349 p.

Sigg, L., Behra, P., &Stumm, W., 2001. Chimie des milieux aquatiques. Dunod.

Spencer KL, MacLeod CL., 2002. Distribution and partitioning of heavy metals in estuarine sediment cores and implications for the use of sediment quality standards. Hydrology and Earth System Sciences; 6 (6): 989-998.

Tahri M, Benyaïch F, Bounakhla M et al., 2005. Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (central Morocco). Environ Monit Assess 102:405– 417. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-6572-7>.

Taleb, A., Belaidi, N., & Gagneur, J., 2004. Water quality before and after dam building on a heavily polluted river in semi-arid Algeria. River Research and Applications, 20(8), 943-956.

Tessier, E., 2012. Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/métalloïdes dans la rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité. Thèse de doctorat en science. Université de Toulon, 292p. Tlemcen (Algérie). Thèse 3^{ème} cycle, Université d'Avignon (France).

BIBLIOGRAPHIE

- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., & Jeffrey, D. W.,** 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländermeeresuntersuchungen*, 33(1), 566-575.
- Turekian, K. K., &Wedepohl, K. H.,** 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological society of America bulletin*, 72(2), 175-192.
- Vallet, M.,** 1985. Analyse des données.
- Varol M, Şen B.,** 2012 Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey. *CATENA* 92:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.011>
- Viala, A.,** 1998. *Éléments de toxicologie. Techniques et documentation.* Ed Lavoisier ; Paris : 117-319 p.
- Volle M.,** 1985. Conjugaison par tranches. *Annali di Matematica pura ed applicata*, 139(1), 279-311.
- W.H.O.,** 1987. Global pollution and health results of related environmental monitoring. Global Environment Monitoring system, WHO, UNEP.
- WHO (World Health Organization),** 2001. Depleted uranium: Sources, exposure and health effects.
- Woods A.,** 2009. Tracing the distribution of heavy metals in the sediments of the Pearl River Estuary. M. Sc. Thesis; Durham University.
- Zettam, A.,** 2018. Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la mer Méditerranée-approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versants Nord africains (Doctoral dissertation).
- Zhu, X., Ji, H., Chen, Y., Qiao, M., & Tang, L.,** 2013. Assessment and sources of heavy metals in surface sediments of Miyun Reservoir, Beijing. *Environmental monitoring and assessment*, 185(7), 6049-6062.

ANNEXE

ANNEXE1 : Exemple de quelques herbicides, fongicides et fertilisants utilisés dans le bassin versant de la Tafna (Ministère d’agriculture algérien, 2011).

Types produits phytosanitaire	Herbicides	Composition chimique
Herbicides	Chevalier (kg) Mustang (L) Granstar (kg) Topik (L) Palas (L) Brumby (L) Cossack (L)	mesosulfuron-methyl, iodosulfuron-méthyl-sodium, thiencarbazone-methyl, méfenpyr-diéthyl Flurasulam, D Ester Thifensulfuron méthyle, Tribénuron méthyle. Clodinafop-propargyl, Cloquintocet-mexyl Pyroxsulam, Cloquintocet – mexyl Clodinafop-propargyl, Cloquintocet-mexyl mesosulfuron-methyl (mesomaxx), iodosulfuron-methyl-sodium, mefenpyr-diethyl
Fongicides	Tilt (L) Artéa (L) Falcon (L)	Triazoles. Cyproconazole, Propiconazole. Spiroxamine, tébuconazole, triadiméno
Fertilisants	T.S.P (46%) Urée (46%) Fosfactyl Phosfert	Phosphore, Calcium, Anhydride Sulfurique (So3) CO(NH2)2 18% de SO3 Azote ammoniacal, Anhydride phosphorique (P2O5)

ARTICLE



Monitoring and evaluation of heavy metal pollution in surface water of Tafna wadi (Algeria)

Soumia Benmostefa^{1,2} · Nacera Dali Youcef² · Mohamed Hadjel¹

Received: 7 January 2022 / Accepted: 12 August 2022
© Saudi Society for Geosciences 2022

Abstract

This study aims to characterize the surface water downstream of Wadi Tafna (North-Western Algeria) and determine the metal pollution level. This was achieved by collecting samples from five stations over a 1-year period and investigating several physicochemical parameters such as temperature, pH, electrical conductivity, and salinity. The total concentrations of iron, copper, zinc, nickel, lead, and cadmium were measured using an atomic absorption spectrophotometer. The obtained results showed that the concentrations of copper, nickel, lead, and cadmium in the water exceed the maximum concentration criteria by the Environmental Protection Agency. The pollution level was assessed via the contamination factor (C_f^i) and contamination degree (C_d). Based on the nature of the metal contaminant, surface water from all sites was classified via C_f^i into one of three classes: considerable contamination by lead ($3 \leq C_f^i \leq 6$), moderate contamination by copper and cadmium ($C_f^i > 1$), and low contamination by iron, zinc, and nickel ($C_f^i < 1$). Calculations of the contamination degree (C_d) reveal mean values of cadmium in the range of 6.80–7.64, which indicates that the water from all stations is moderately contaminated ($C_d > 6$). Analysis of the large collected set of surface water quality data from Tafna Wadi was conducted via multivariate statistical techniques such as ANOVA and principal component analysis.

Keywords Tafna wadi · Heavy metal · Surface water · Pollution · ANOVA · PCA

Introduction

Metals are among the most harmful industrial pollutants to the environment, causing considerable harm upon exceeding certain concentrations (El Nemr et al. 2016; Wang et al. 2021b; Rathi et al. 2021; Li et al. 2022). Heavy metals in particular are considered impactful pollutants because of their toxicity, persistence, and non-degradability in the

environment. The impact of heavy metals on the environment arises from (1) their potential toxic effects when consumed in high concentrations that the natural (tolerable) intake levels, and from (2) excessive anthropogenic sources of said metals which may equal or exceed the natural intake levels (El Nemr et al. 2016; Wang et al. 2021b; Rathi et al. 2021; Li et al. 2022). Urban rivers are important sinks for heavy metal pollution in urban areas (Salati and Moore 2010; Magni et al. 2021; Wang et al. 2021a) and significant quantities of heavy metals are discharged into rivers, which causes accumulation in water, sediment, and across aquatic food chains (Wang et al. 2016). Surface waters are important to the constitution and composition of natural landscapes; thus, it is important to understand their metal contamination levels since this helps understand the extent of migration of said elements in water and the resulting formation/extinction events, both of various trophic chains and levels within each chain (Chevychelov and Kuznetsova 2016).

Spatial studies of large-scale metal concentrations are often used to provide baseline information for the assessment of environmental risks and to investigate anthropogenic

Responsible Editor: Amjad Kallel

✉ Soumia Benmostefa
benmostafa.soumia@gmail.com;
soumia.benmostefa@univ-usto.dz

¹ Laboratory of Sciences and the Technology and Process Engineering LSTGP, Faculty of Chemistry, Department of Industrial Organic Chemistry, University of Sciences and the Technology Mohamed Boudiaf USTO-MB, 31000 Oran, Algeria

² Health Applications, Laboratory of Valuation of Shares Rights for the Protection of the Environment and Public, University of Tlemcen, BP 119, 13000 Tlemcen, Algeria

impacts on ecosystems (Xu et al. 2016). To improve the reliability of water quality analyses, several sites are usually sampled within the area of study, which allows for better accounting of seasonal variations in chemical levels (background and anthropogenic) (Boronina et al. 2016; Foufou et al. 2017; Yazidi et al. 2017; Basahi et al. 2018; Khouni et al. 2021).

The Tafna is a river located in North-West Algeria which crosses the states (“wilayas”) of Aïn Temouchent and Tlemcen and flows into the Mediterranean. The main source of Tafna is Mount Merchiche (“Djebel Merchiche”), in the Mountains of Tlemcen (“Monts de Tlemcen”) near Sebdoou town. This river that provides water is known for its agricultural dynamism and supplies the wilayas of the west where it is used to support the different water requirements of the local populations. However, a significant increase in industrialization has been noticed in this region over the last few decades, and the rise in the number of industrial areas may be a significant influence on the quality of water and cause significant risk to human health and the environment. This river was exposed to several types of pollutants, as is common for agricultural regions surrounded by industrial areas. The use of pesticides, fertilizers, and pesticides for agriculture, in addition to the poor management of the region’s waste—both industrial and domestic—has led to various forms of environmental pollution in the region. Therefore, it was deemed important to conduct an in-depth study of heavy metal pollution in this region to obtain the necessary pollution profile and warn consumers about the resulting risks.

The main objective of this study is thus to determine the current state of metal pollution in the Tafna Wadi as a follow-up to previous work conducted on metal pollution and

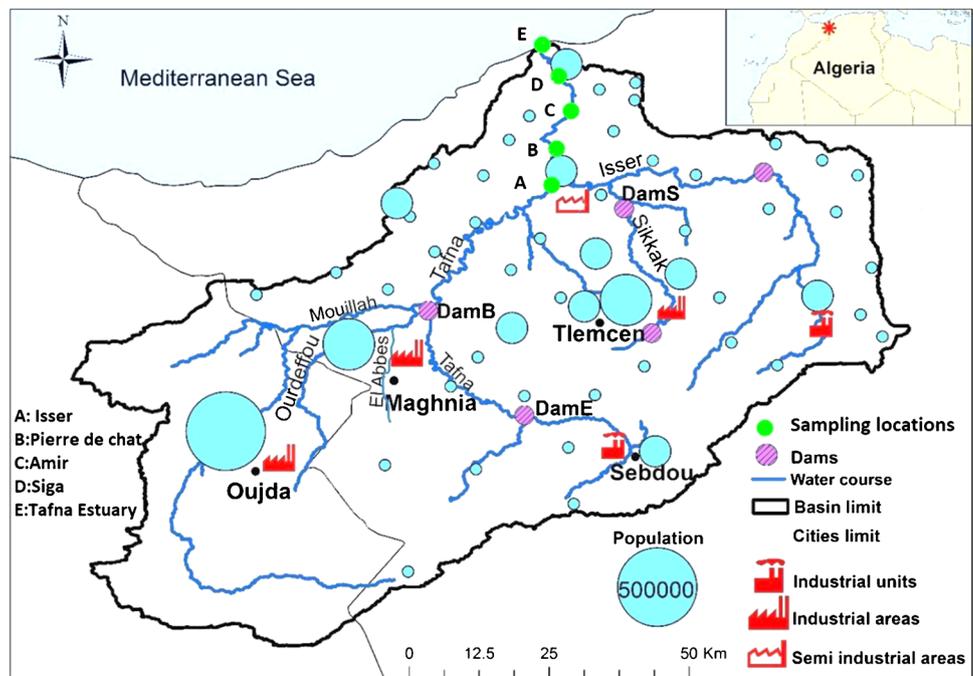
ecosystem databasing in Algeria. To this end, five stations were selected and studied by measuring the concentrations of heavy metals in the collected water samples every month for a year, and the results were used to investigate correlations between the agricultural sites, polluted areas, and degree of pollution by different toxic heavy metals.

Experimental

Area study and sampling sites

Tafna is one of the important wadis in North Western Algeria, having a length of 170 km, and a basin area of about 7245 km² (see Fig. 1). It is continuously exposed to industrial, urban, and agricultural wastes including a large number of metal ions (Dali-youcef et al. 2006; Benabelkader et al. 2018, 2019). The samples were taken from five stations along the Tafna Wadi downstream every month between December 2012 and November 2013. The first sampling station, Isser, is a town located at a distance of 5 km from Remchi town. The second sampling station is Pierre du Chat, a town located 8 km from Isser. The third station is Amir, a town located 10 km from the second station, and is an agricultural region situated with a gas station close to it. The fourth station, Siga, is a town located 9 km from the Tafna estuary. The last area is the Mouth of Rachgoun Beach, a large fishing and tourist town located in the mouth of Tafna valley in Tafna estuary, with a population of about 45,700. The region as a whole has a Mediterranean climate with semi-arid temperatures and rainfalls.

Fig. 1 Sampling locations at Tafna wadi



Sampling and analysis

The choice of sampling sites was based on the technical feasibility of collecting surface water, and the potential contamination of the environment as observed from household and/or industrial and domestic wastes as well as the presence of strong agricultural activity. To qualify and quantify the pollution, the samples were collected from each station monthly for an entire year at regular intervals (i.e., day of month, time of day).

The samples of surface water taken at each station were placed in pre-labeled polyethylene vials first by rinsing the said vials with water from the site before filling them in full. The physicochemical parameters (water and air temperature, pH, electrical conductivity, and salinity) were measured every month by recording the said measurements directly from the water field. Two to 3 drops of pure nitric acid were added to each of the bottles assigned for the measurement of heavy metal content.

An atomic absorption spectrometer (IA AURORA 1200) was used to measure each sample for the content of the following metals: iron, copper, nickel, zinc, lead, and cadmium. Each measurement was triplicated, and the average and standard deviation were obtained and reported. The accuracy

of the analytical procedures used in this study was verified by comparison against a standard published by the National Research Council of Canada (MESS-1).

Results and discussion

Physicochemical parameters

The physicochemical properties and the monthly monitored parameters from the five stations measured over a period of 1 year are shown in Table 1 and will be discussed to help understand the water quality downstream of Tafna Wadi and any deterioration thereof. First, the water temperature was measured at the five stations throughout the year, and all values were measured in the morning. This was done to help understand the correlation of water temperature to environmental conditions, especially geographic location and climate. The water temperature was found to be in the range of 12.5–14.5 °C during winter and 27 °C during summer, which is consistent with the climate profile of Tafna Wadi (generally moderate temperature and high humidity). The highest temperatures were recorded during the dry season and the lowest during the rainy season.

Table 1 Physicochemical parameters of water collected at five study stations from Tafna Wadi

		Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sept	Oct	Nov
Isser	T eau (°C)	13	12.5	13	13.5	15.5	18	22.5	25	26	26	21	16
	pH	8.25	8.8	8.18	8.3	8.6	8.3	8.35	8.1	8.72	8	8.9	8.1
	Cond (µS/cm)	1405	1540	1608	1680	1560	1702	1870	1965	1810	1790	1570	1430
	Salinity (µg/l)	931	1039	1073	1109	975	1006	1001	998	897	886	862	879
Pierre du chat	T eau (°C)	13	13	13	13.5	15.5	18.5	22	26.5	26.5	25	20	15.5
	pH	8.12	9.1	8.1	8.1	8.05	8.6	9.04	8.09	8.6	8.4	8.45	8.2
	Cond (µS/cm)	1903	1710	1861	1670	1695	1740	1815	1957	1840	1976	1764	1834
	Salinity (µg/l)	1281	1144	1251	1108	1064	1017	981	963	903	1004	996	1156
Amir	T eau (°C)	13	13	13.5	14	16	18	21	26	27	25	22	15
	pH	8.3	9.2	8.05	8.1	8.4	8.1	8.8	8.7	8.9	8.2	9.1	8.4
	Cond (µS/cm)	1855	1981	2013	1964	2084	2123	1984	2064	1962	2074	2162	2095
	Salinity (µg/l)	1247	1336	1341	1290	1306	1269	1102	1029	956	1057	1179	1347
Siga	T eau (°C)	13.4	13	13.5	14.5	16.5	19	22	25.5	26.5	25.5	21.5	15.5
	pH	8.2	8.6	8.1	8.6	8.4	8	8.71	8.2	8.9	8.07	8.7	8
	Cond (µS/cm)	2590	2462	2637	2542	2471	2607	2541	2498	2703	2516	2671	2491
	Salinity (µg/l)	1754	1680	1784	1672	1544	1539	1397	1271	1353	1281	1490	1596
Tafna estuary	T eau (°C)	14	14.5	14	14.5	16.5	19	21.5	25	27	25	21.5	15
	pH	8.08	8.7	8	8.2	9.02	8.2	8.2	8.15	8.4	8.65	8.7	8.04
	Cond (µS/cm)	2720	2764	2831	2675	2848	2758	2889	3034	2961	2817	3167	2993
	Salinity (µg/l)	1819	1827	1898	1765	1794	1650	1618	1578	1474	1489	1784	1963

As for pH, the measured values fluctuate in the range of 8–9.1 (Table 1), and a trend is observed where pH is higher during the cold seasons, and lower during the warm seasons. Moreover, there is a slight geographical gradient-based increase in pH from upstream to downstream. pH fluctuation may be attributed to several complex interplaying factors such as the organic matter content in the water, and seasonal evaporation rate as well as natural environmental factors, such as the vegetation cover, rock topology, and human activities in the area.

Conductivity measurement of water is a good indicator of the degree of mineralization, as conductivity is caused by free ions (including metals). The measured averages vary from 1405 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at Isser to 3167 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at Tafna estuary, indicating a geographical gradient-based rise from upstream to downstream. This is consistent with the slight rise in pH observed from upstream to downstream, as pH is a function of H^+/OH^- ionization, and both ionization and mineralization may contribute to electrical conductivity.

The mean value of salinity rises via a similar gradient from 862 $\mu\text{g}/\text{l}$ at Isser to 1963 $\mu\text{g}/\text{l}$ at Tafna estuary during the rainy season. This is consistent with the pH and conductivity trends, as salinity is a contributor to electrical conductivity. Moreover, it is observed that water salinity decreases during the rainy season and rises during the dry season, which may be explained by evaporation leading to a rise in salt concentrations.

Heavy metals in water

The concentrations of metals (iron, copper, nickel, lead, zinc, and cadmium) in the surface waters of the five sites are shown in Fig. 2. The values for the maximum permission concentrations for surface water in this research were based on the standards set by the US EPA (2004) for nationally recommended water quality criteria. The obtained results show that the maximum recorded iron concentration at every site was $0.072 \pm 0.0028 \text{ mg}/\text{L}$ at Isser in November, $0.073 \pm 0.004 \text{ mg}/\text{L}$ at Pierre du chat in August, $0.076 \pm 0.009 \text{ mg}/\text{L}$ at Amir in November, $0.095 \pm 0.007 \text{ mg}/\text{L}$ at Siga in November and $0.053 \pm 0.002 \text{ mg}/\text{L}$ at estuary Tafna in November. Throughout the study period, the measured average iron concentration did not exceed the background value of 5 mg/L (established by Soil First Consulting) (Xu et al. 2016).

The maximum recorded concentrations of copper in each site were $0.065 \pm 0.003 \text{ mg}/\text{L}$ at Isser in February, $0.066 \pm 0.001 \text{ mg}/\text{L}$ at Pierre du chat in September, $0.058 \pm 0.002 \text{ mg}/\text{L}$ at Amir in April, $0.059 \pm 0.001 \text{ mg}/\text{L}$ at Siga in July, and $0.052 \pm 0.002 \text{ mg}/\text{L}$ at estuary Tafna in August. All values exceed the criterion maximum concentration of 0.013 mg/L . This is strongly linked to the use of

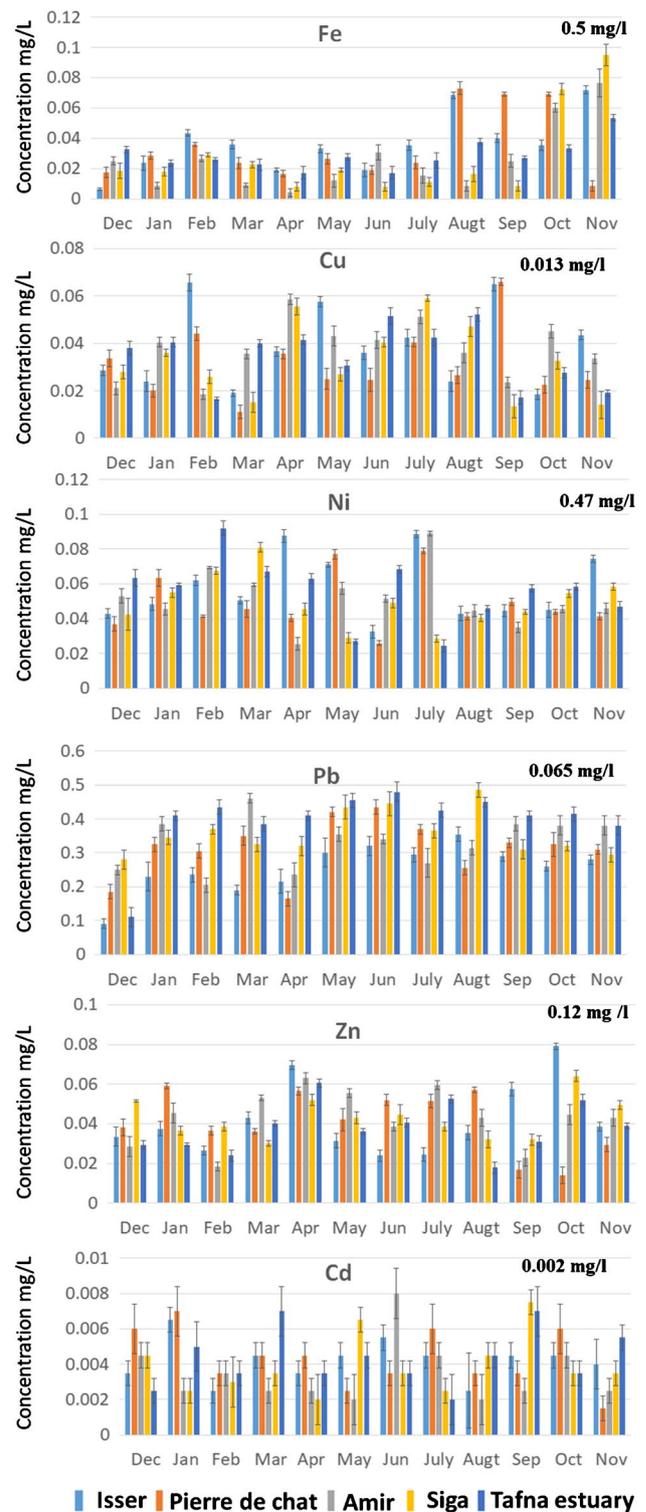


Fig. 2 Variation of metal concentrations in the water of the five study sites of Wadi Tafna during 1 year

Table 2 Factor and degree of contamination classes (Hakanson 1980)

Contamination factor (C_f^i)	Degree of contamination (C_d)	Contamination class
$C_f^i < 1$	$C_d < 6$	Low contamination factor
$1 \leq C_f^i \leq 3$	$6 \leq C_d < 12$	Moderate contamination
$3 \leq C_f^i \leq 6$	$12 \leq C_d < 24$	Considerable contamination
$C_f^i > 6$	$C_d \geq 24$	Very high contamination

this metal in the Wadi Tafna area for many purposes, most notably agricultural.

The maximum concentrations of zinc were 0.079 ± 0.001 mg/L at Isser in October, 0.059 ± 0.0014 mg/L at Pierre du chat in January, 0.063 ± 0.0021 mg/L at Amir in April, 0.064 ± 0.003 mg/L at Siga in October, and 0.06 ± 0.002 mg/L at Tafna estuary in April. These average concentrations do not exceed the background value of 0.120 mg/L according to the US EPA nationally recommended water quality criteria.

Nickel maximum concentrations were found to be 0.088 ± 0.002 mg/L at Isser in July, 0.079 ± 0.001 mg/L at Pierre du chat in July, 0.089 ± 0.001 mg/L at Amir in July, 0.081 ± 0.002 mg/L at Siga in March, and 0.092 ± 0.004 mg/L at estuary Tafna in February. All of these values are below the reference the US EPA value of 0.47 mg/L. Thus, these measured levels may be attributed to natural sources (windblown soil, volcanoes, vegetation, forest fires, sea salt, and meteoric dust), responsible for about 35% of total global emissions of said metal (Awadh 2015).

As for lead, the maximum concentrations measured for this metal are 0.35 ± 0.021 mg/L at Isser in August, 0.43 ± 0.03 mg/L at Pierre du chat in June, 0.46 ± 0.01 mg/L at Amir in March, 0.48 ± 0.02 mg/L at Siga in August, and 0.45 ± 0.04 mg/L at estuary Tafna in May. All of these concentrations greatly exceed the US EPA reference value of 0.065 mg/L.

In general, it can be noticed from the date that several of these metals reach their peak concentrations in August,

following the dry season. Cadmium pollution is also important, and the results of our study indicate a high concentration of this element across all months and over the entire study period. This is of particular concern due to the environmental and health risks that may be caused by this particularly potent pollutant. The highest recorded concentrations of cadmium are 0.0065 ± 0.0007 mg/L at Isser in January, 0.007 ± 0.001 mg/L at Pierre du chat in January, 0.008 ± 0.001 mg/L at Amir in June, 0.0075 ± 0.0007 mg/L at Siga in September, and 0.007 ± 0.001 mg/L at estuary Tafna in March. All these values exceed the limit value (0.002 mg/L) according to the US EPA.

According to the obtained results, the order of concentrations of metallic species by station is:

1. Isser: nickel > zinc > copper > iron > lead > cadmium,
2. Pierre du chat: nickel > zinc > iron > lead > copper > cadmium,
3. Amir: nickel > zinc > copper > lead > iron > cadmium,
4. Siga: nickel > zinc > lead > copper > iron > cadmium,
5. Tafna estuary: nickel > lead > zinc > copper > iron > cadmium

The highest concentration in all stations is that of nickel, followed by zinc (except in Tafna estuary), while the lowest is always that of cadmium. The concentration positions of copper, iron, and lead are interchangeable.

The contamination index C_d

The contamination index measures the combined contamination impact on the environment of all toxic substances present in water by (1) measuring the individual contamination effect of each substance via its contamination factor C_f^i , and (2) summing up C_f^i for all said substances to yield the degree of contamination C_d (Abdel-Satar et al. 2017). As for the contamination factor C_f^i , in the version originally suggested by Hakanson, the assessment of contamination was

Table 3 Contamination factor (C_f^i), contamination degree (C_d)

	Contamination factor (C_f^i)						Contamination degree (C_d)
	Iron*	Copper**	Zinc*	Nickel*	Lead***	Cadmium**	
Isser	0.01	2.95	0.35	0.12	3.92	2.10	7.64
Pierre du chat	0.01	2.39	0.34	0.10	4.84	2.17	7.18
Amir	0.01	2.87	0.36	0.11	5.08	1.73	6.80
Siga	0.01	2.53	0.36	0.11	5.51	1.96	6.91
Tafna estuary	0.01	2.67	0.31	0.12	6.11	2.17	7.44

*Low contamination
 **Moderate contamination
 ***Considerable contamination

conducted by relating the elemental concentrations to pre-industrial levels as a reference (Hakanson 1980), and the resulting parameter C_f^i is expressed by the following equation (Ouchir et al. 2016):

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n^i} \tag{1}$$

where C_f^i is the mean content (e.g., concentration (mol/L), %) of a substance i in water and C_n^i is the reference preindustrial level for the substances and must be expressed in the same form and units as C_n^i . As for the elements studied in this work—copper, zinc, nickel, lead, and cadmium—their C_n^i reference values in water are 0.013, 0.12, 0.470, 0.065, and 0.002 mg/L (Ouchir et al. 2016).

The contamination degree was then calculated by the following equation:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \tag{2}$$

where the degree of contamination C_d represents the sum of the contamination factors of all the pollutants studied, based

on which classification can be made into one of four classes: low, moderate, considerable, and very high.

Table 2 presents the C_f^i contamination factor values as well as the contamination classification limits for each metal based on the water quality criteria recommended by the US EPA (2004).

Table 3 presents the contamination factor for each metal based on measurements from the five stations in Tafna Wadi. The results show that the contamination level is low ($C_f^i < 1$) for iron, zinc, and nickel; moderate ($C_f^i > 1$) for copper and cadmium; and considerable ($3 \leq C_f^i \leq 6$) for lead. The degree of contamination (C_d) was then measured and found to lie in the range of 6.80–7.64 which again signifies moderate contamination ($C_d > 6$) across stations.

Statistical analysis

Statistical analysis (p -values of two-way ANOVA) was conducted for all metals based on variance correlation between study sites and months. The results revealed a significant variability month-by-month in the concentrations of iron

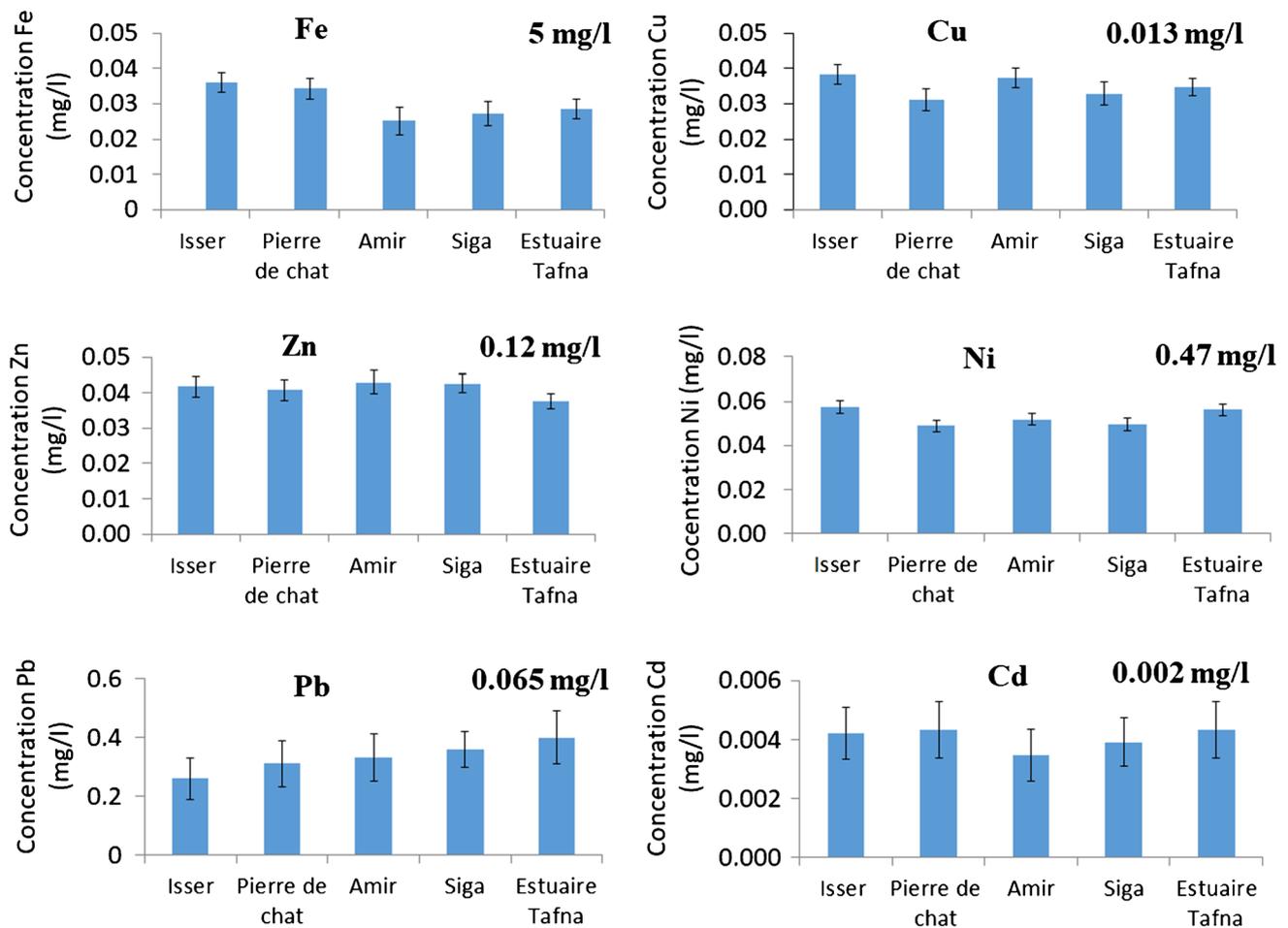


Fig. 3 Spatial variations of metal concentrations in surface water at five sites in Tafna wadi

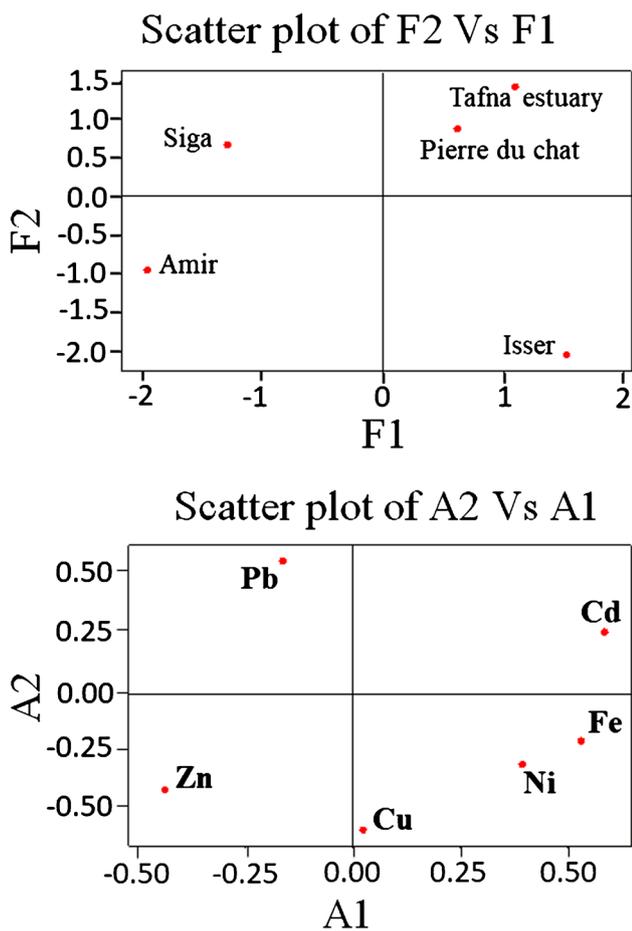


Fig. 4 Biplots for the first and second axis of the PCR based on the metal concentrations (iron, copper, zinc, nickel, lead, and cadmium) collected at five study sites in Wadi Tafna

and zinc, but not for copper, nickel, lead, and cadmium. The spatial variation study clearly shows that the highest metal concentration values of iron, copper, and nickel are recorded at Isser, while those for zinc are found at the Siga and Amir stations, and finally, the highest levels of lead and cadmium are at the Tafna estuary. The list below presents each metal studied in this work. An ordering of the different stations from highest to lowest in terms of that metal reported concentration:

1. Iron: Isser > Pierre du Chat > Estuary Tafna > Siga > Amir
2. Copper: Isser > Amir > Estuary Tafna > Siga > Pierre du Chat
3. Nickel: Isser > Estuary Tafna > Pierre du Chat > Amir > Siga
4. Lead: Estuary Tafna > Siga > Amir > Pierre du Chat > Isser
5. Zinc: (Siga, Amir) > estuary Tafna > Isser > Pierre du Chat

The results in Fig. 3 indicate that almost all the metal concentrations were significantly low ($p < 0.05$) from one site to another (ANOVA 1).

Principal component analysis (PCA) was also used to determine the common pollution sources, as the frequency diagrams of chemical parameters do not follow a normal distribution. Therefore, PCA was carried out using a logarithmic transformation of the data set because the latter is closer to the normality condition required for these analyses (Al-Taani et al. 2015). Variations were tested by two-way

Fig. 5 The dendrogram of hierarchical cluster analysis (HCA) for metal concentrations in surface water in Tafna wadi

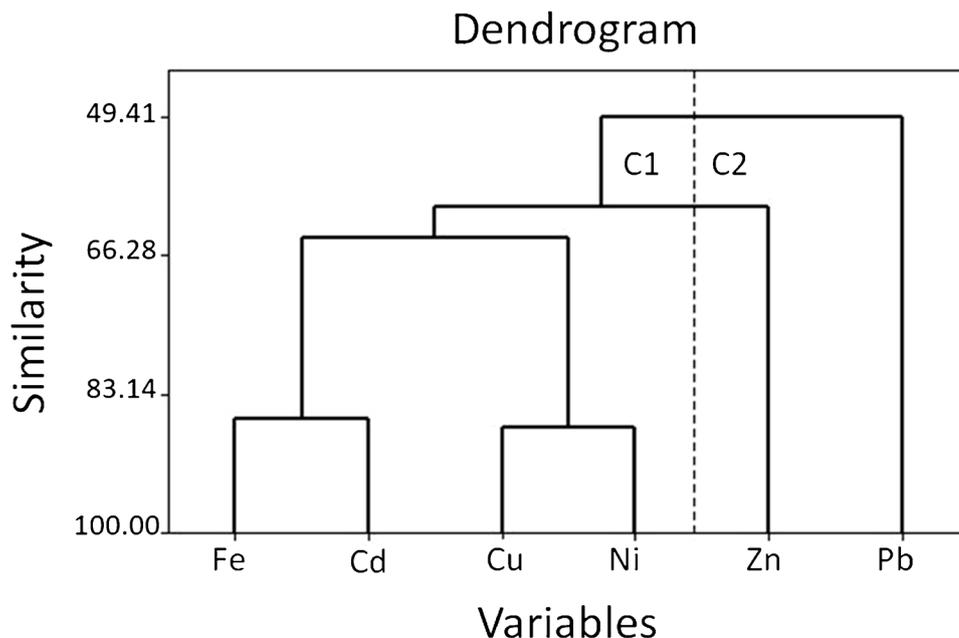


Table 4 Comparison with the literature and background values (mg/L)

Localization	Iron	Copper	Zinc	Nickel	Lead	Cadmium	Reference
Tafna oued Algeria	0.006–0.095	0.01–0.05	0.014–0.07	0.024–0.092	0.09–0.48	0.001–0.008	This study
Oued Boufekrane (Meknes, Morocco)	0.006–0.025	0.013–0.046	0.002–0.013	0.001–0.005	–		Tahri et al. (2005)
Oued Hassar	0.002–0.123	0.012–0.036	0.034–0.054	–	< 0.004	0.022–0.023	Fouad (2013)
Upper Tigris River, Turkey	0.007–0.388	0.001–0.165	0.001–0.037	0.058–0.072	0.0002–0.0003	Nd–0.0013	Varol and Şen (2012)
Nile River, Egypt	0.199–2.211	0.010–0.05	0.01–0.108	0.001–0.033	0.005–0.05	0.0002–0.008	Abdel-Satar et al. (2017)
Khoshk River Iran		0.01–0.2	0.05–2.73	0.01–0.2	0.02–0.13	Nd–0.18	Salati and Moore (2010)
US EPA (2004)	5*	0.013	0.120	0.470	0.065	0.002	National Recommended water Quality Criteria

*Irrigation water guidelines soil first consulting

ANOVA with sites and months as factors. Statistical significance was accepted at $p < 0.05$ (Duarte et al. 2012).

Figure 4 shows biplots for the first and second axes of PCR based on mean metal concentrations (iron, copper, zinc, nickel, lead, and cadmium) measured at the five stations downstream of Wadi Tafna. To study inter-elemental associations, the correlation coefficients of the studied metals were computed across stations (Kouidri et al. 2016).

The first component shown in Fig. 4 is characterized by positive contributions of iron (0.53) and represents 39.3% of the variance between metals. It can be concluded from these results that the minerals have the same properties, which means that they have a common human source. The second component is characterized by positive contributions of lead (0.56), representing 34.6% of the variance between metals. Negative contributions of copper (0.57) can have similar behavior.

The eight elements measured from the water samples were represented in terms of their concentrations in the dendrogram shown in Fig. 5 and classified into two groups, i.e., C1 and C2, with group C1 (iron, cadmium, copper, and nickel) having lower bond distances and greater similarity compared to group C2 (zinc and lead). Table 4 shows a comparison of the metal contamination in the surface waters of Wadi Tafna with contamination levels in other rivers. The results revealed there is no iron or nickel pollution in any of these rivers. The concentrations are far from the limit value according to Soil First Consulting (in accordance with the irrigation water guidelines) for iron and the US EPA for nickel. Lead was found at higher concentrations in Tafna Wadi than the values recorded in Oued Boufekrane and Oued Hassar in Morocco, in the Upper Tigris River in Turkey, the Nile River in Egypt, and the Khoshk River in Iran. On the other hand, copper, cadmium, and zinc were found to be present at varying concentrations in all rivers. As for copper, it is clear that the Upper Tigris River in Turkey contains

the highest concentration (0.001–0.165 mg/L), almost ten times higher than the standards. On the other hand, in the case of cadmium, it exceeds the standard concentrations at all the sites presented in Table 4. However, it is clear that the Khoshk river in Iran contains the highest cadmium concentration value, with a concentration almost ninety times higher than that of the standards. From this study, it is thus clear that Tafna Wadi does not present significant pollution compared to the sites mentioned in Table 4.

Conclusions

Wadi Tafna is an important source of irrigation water in western Algeria. Several factors can affect the water quality in this wadi, including agriculture, industrial, and municipal waste, as well as various human activities. The metal levels for iron, copper, zinc, nickel, lead, and cadmium in the surface water of the wadi are presented in this study along with their spatial distribution across five sites from upstream to downstream. This study also shows that the concentrations of copper, lead, and cadmium in all sites are consistently higher throughout the year than the standards set via the National Recommended Water Quality Criteria (US-EPA).

The assessment of the metal content of surface waters by using the contamination factor and based on the US-EPA shows that the surface waters of the Tafna Wadi are not contaminated by iron, zinc, and nickel; moderately contaminated by copper and cadmium; and considerably contaminated by lead, with the overall degree of contamination moderate across stations. The results of this study can be used to help plan the draining of metals into the Tafna wadi and to find a strategy for managing wadis as well as for the treatment of polluted discharges that affect water quality. While this particular work was focused on the study of the pollution of various sites located in Wadi Tafna by determining the

content of various metals, it should be emphasized that water pollution is a result not only of the presence or increase of concentration of these metallic elements but also of other families of pollutants such as dyes and pesticides which can pose major problems to the health of human beings and other species. These should also be taken into consideration in future studies.

Declarations

Ethical approval This article does not contain any studies with human or animal subjects.

Informed consent Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

Conflict of interest The authors declare that they have no competing interests.

References

- Abdel-Satar AM, Ali MH, Goher ME (2017) Indices of water quality and metal pollution of Nile River. *Egypt the Egyptian Journal of Aquatic Research* 43:21–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2016.12.006>
- Al-Taani AA, Batayneh AT, El-Radaideh N et al (2015) Spatial distribution and pollution assessment of trace metals in surface sediments of Ziqlab Reservoir. *Jordan Environmental Monitoring and Assessment* 187:32. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4289-9>
- Awadh SM (2015) Cd, Ni, and Pb distribution and pollution assessment in roadside dust from Baghdad City and Western Iraqi Desert. *Arab J Geosci* 8:315–323. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1204-y>
- Basahi JM, Masoud MHZ, Rajmohan N (2018) Effect of flash flood on trace metal pollution in the groundwater - Wadi Baysh Basin, western Saudi Arabia. *J Afr Earth Sc* 147:338–351. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.06.032>
- Benabdelkader A, Taleb A, Probst JL et al (2018) Anthropogenic contribution and influencing factors on metal features in fluvial sediments from a semi-arid Mediterranean river basin (Tafna River, Algeria): a multi-indices approach. *Sci Total Environ* 626:899–914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.107>
- Benabdelkader A, Taleb A, Probst JL et al (2019) Origin, distribution, and behaviour of rare earth elements in river bed sediments from a carbonate semi-arid basin (Tafna River, Algeria). *Appl Geochem* 106:96–111. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.05.005>
- Boronina LV, Sadchikov PN, Tazhieva SZ, Moskvicheva EV (2016) Studying seasonal dynamics of surface water pollution in Lower Volga Basin. *Water Resour* 43:657–662. <https://doi.org/10.1134/S0097807816040059>
- Chevychelov AP, Kuznetsova LI (2016) Variations of the concentrations of major ions and nutrients in surface water of Southern Yakutia at the industrial development of the territory. *Water Resour* 43:504–512. <https://doi.org/10.1134/S0097807816030040>
- Dali-youcef N, Ouddane B, Derriche Z (2006) Adsorption of zinc on natural sediment of Tafna River (Algeria). *J Hazard Mater* 137:1263–1270. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.03.068>
- Duarte CA, Giarratano E, Gil MN (2012) Trace metal content in sediments and autochthonous intertidal organisms from two adjacent bays near Ushuaia, Beagle Channel (Argentina). *Mar Environ Res* 79:55–62. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.05.003>
- El Nemr A, El-Said GF, Ragab S et al (2016) The distribution, contamination and risk assessment of heavy metals in sediment and shellfish from the Red Sea coast. *Egypt Chemosphere* 165:369–380. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.048>
- Foufou A, Djorfi S, Haied N et al (2017) Water pollution diagnosis and risk assessment of Wadi Zied plain aquifer caused by the leachates of Annaba landfill (N-E Algeria). *Energy Procedia* 119:393–406. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.123>
- Hakanson L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Res* 14:975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Khouni I, Louhichi G, Ghrabi A (2021) Use of GIS based inverse distance weighted interpolation to assess surface water quality: case of Wadi El Bey. *Tunisia Environmental Technology & Innovation* 24:101892. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101892>
- Koudiri M, Dali youcef N, Benabdellah I et al (2016) Enrichment and geoaccumulation of heavy metals and risk assessment of sediments from coast of Ain Temouchent (Algeria). *Arab J Geosci* 9:354. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2377-y>
- Li D, Yu R, Chen J et al (2022) Ecological risk of heavy metals in lake sediments of China: a national-scale integrated analysis. *J Clean Prod* 334:130206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130206>
- Magni LF, Castro LN, Rendina AE (2021) Evaluation of heavy metal contamination levels in river sediments and their risk to human health in urban areas: a case study in the Matanza-Riachuelo Basin. *Argentina Environmental Research* 197:110979. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110979>
- Ouchir N, Aissa LB, Boughdiri M, Aydi A (2016) Assessment of heavy metal contamination status in sediments and identification of pollution source in Ichkeul Lake and rivers ecosystem, northern Tunisia. *Arab J Geosci* 9:539. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2560-1>
- Rathi BS, Kumar PS, Vo D-VN (2021) Critical review on hazardous pollutants in water environment: occurrence, monitoring, fate, removal technologies and risk assessment. *Sci Total Environ* 797:149134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149134>
- Salati S, Moore F (2010) Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran. *Environ Monit Assess* 164:677–689. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0920-y>
- Tahri M, Benyaïch F, Bounakhla M et al (2005) Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (central Morocco). *Environ Monit Assess* 102:405–417. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-6572-7>
- Varol M, Şen B (2012) Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey. *CATENA* 92:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.011>
- Wang Y, Wei Y, Guo P et al (2016) Distribution variation of heavy metals in maricultural sediments and their enrichment, ecological risk and possible source—a case study from Zhelin bay in Southern China. *Mar Pollut Bull* 113:240–246. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.028>
- Wang F, Dong W, Zhao Z et al (2021a) Heavy metal pollution in urban river sediment of different urban functional areas and its influence on microbial community structure. *Sci Total Environ* 778:146383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146383>
- Wang X, Zhang C, Wang C et al (2021b) Probabilistic-fuzzy risk assessment and source analysis of heavy metals in soil considering uncertainty: a case study of Jinling Reservoir in China. *Ecotoxicol Environ Saf* 222:112537. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112537>
- Xu X, Cao Z, Zhang Z et al (2016) Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the surface sediments of the Bohai and Yellow Seas. *Mar Pollut Bull* 110:596–602. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.079>

- Yazidi A, Saidi S, Ben Mbarek N, Darragi F (2017) Contribution of GIS to evaluate surface water pollution by heavy metals: case of Ichkeul Lake (Northern Tunisia). *J Afr Earth Sc* 134:166–173. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.009>
- Fouad S (2013) QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET CONTAMINATION METALLIQUE DES EAUX DE L_OUED HASSAR : IMPACTS DES EAUX USEES DE LA LOCALITE DE MEDIOUNA (PERIURBAIN DE CASABLANCA, MAROC)

Springer Nature or its licensor holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.