



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Prédiction de l'évolution spatio-temporelle du fer à l'exutoire d'un fleuve tropical : cas du fleuve Sassandra à Gaoulou (Côte d'Ivoire)

Marcel Konan YAO ^{1*}, Lako AGBRI ², Siaka Barthélemy BAMBA ³,
Bernard Métongo SORO ³ et Albert TROKOUREY ¹

¹Laboratoire de Chimie Physique Université Félix Houphouët-Boigny Abidjan, UFR SSMT, B.P. V34 Abidjan, Côte d'Ivoire.

²Laboratoire Géosciences et Environnement (LGE), UFR Sciences et Gestion de l'Environnement (SGE), Université d'Abobo-Adjamé, UFR SGE 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire.

³Centre de Recherches Océanologiques, Rue des pêcheurs, BP V 18 Abidjan, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant ; E-mail : yaomarcelkonan@yahoo.fr ; yaomarcelkonan@gmail.com ;
Tél: +225 07130942.

RÉSUMÉ

La modélisation de l'évolution spatio-temporelle du fer à l'exutoire du fleuve Sassandra (la station hydrométrique de Gaoulou) a fait l'objet de cette étude. Pour ce faire, il a été utilisé le modèle hybride « ACP-PMC ». Deux scénarios ont été étudiés : la modélisation statique du fer et la modélisation dynamique du fer. La première partie de cette étude a été consacrée à la recherche des paramètres d'entrée du perceptron multicouche (PMC) par l'analyse en composante principale (ACP). Les résultats obtenus ont permis de choisir comme paramètres d'entrée pour la modélisation statique du fer : les ions sulfates (SO_4^{2-}), le pH, la conductivité, le dioxyde de silicium (SiO_2) et le débit mensuel du fleuve Sassandra. A ces paramètres, il a été ajouté le paramètre temps (mois) pour la modélisation dynamique du fer. Les différentes simulations réalisées par le PMC, ont permis de montrer que les modèles 5-1-1 et 6-12-1 prédisent à plus de 99% respectivement les évolutions statique et dynamique du fer à Gaoulou. Ainsi, l'utilisation de ce modèle hybride est-t-il jugée très satisfaisante. Ce modèle peut servir de socle pour d'éventuelles études visant la gestion rationnelle, la protection et le développement durable du fleuve Sassandra et de l'océan Atlantique au niveau de l'exutoire de ce fleuve.

© 2016 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : ACP, modèle « ACP-PMC », océan Atlantique, pollution métallique, PMC.

Prediction of the spatial and temporal evolution of the iron at tropical river outfall: case of Sassandra River at Gaoulou (Côte d'Ivoire)

ABSTRACT

The modeling of the spatial and temporal evolution of the iron at the Sassandra River outfall (hydrometric station of Gaoulou) is the subject of this study. To do this, it was used the hybrid model "PCA-MLP." Two scenarios were studied: static modeling of iron and dynamic modeling of iron. The first part of this study has been devoted to research of the input parameters of multilayer perceptron (MLP) by principal component analysis (PCA). The results obtained allowed to select as input parameters for the static modeling of the iron: sulphate ions (SO_4^{2-}), pH, conductivity, silicon dioxide (SiO_2) and the monthly rate of the Sassandra River. In these settings, it was added the time parameter (month) for the dynamic modeling of the

© 2016 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i6.29>

2823-IJBCS

iron. The various simulations performed by the PMC showed that the models 5-1-1 and 6-12-1 predict more than 99% static and dynamic evolutions of the iron at Gaoulou respectively. Thus, the use of this hybrid model is satisfactory. It can be used for any studies to rational management, protection and sustainable development of the Sassandra River and the Atlantic Ocean near to Sassandra outfall.

© 2016 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Atlantic Ocean, metal pollution, model "PCA-MLP", MLP, PCA.

INTRODUCTION

La protection et la gestion rationnelle des eaux de surface pour leur développement durable constituent un enjeu majeur. Ces entités aquatiques sont sujettes à de fortes pollutions eu égard aux intenses pressions anthropiques (Ajonina et al., 2015 ; Goody et al., 2016 ; Kaspersen et al., 2016 ; Ulrich et al., 2016). L'une des formes particulières de cette pollution est celle liée aux éléments en trace métallique (ETM), particulièrement celle au fer. Etant l'ETM le plus abondant dans la croûte terrestre le fer joue un rôle important dans le développement physiologique des organismes vivants. Cependant, sa présence relativement excessive en leur sein y entraînent de nombreux désagréments et pathologies voire la mort ; et cela à des doses létales variant d'un organisme à un autre. Pour l'Homme, il est observé des effets gênants à des concentrations supérieures à 0,3 mg/L. Raison pour laquelle l'OMS (2004) a fixé à 50 µg/L le seuil limite du fer dans les eaux de consommation pour l'Homme. Au-delà des effets néfastes que peut avoir une eau surchargée en fer sur l'Homme, ce type d'eau est également responsable de la tacheté de la lessive et des accessoires de plomberie, le colmatage des conduites, la promotion des ferrobactéries (Bennet et al., 2003). Les diverses techniques de l'élimination du fer dans les eaux sont fastidieuses et onéreuses. De ce fait, il importe de surveiller son évolution spatio-temporelle dans ces entités, particulièrement dans les eaux de surface.

L'une des meilleures approches de ce fait est la modélisation. En effet, la modélisation permet d'extrapoler les résultats des mesures sur terrain qui ne peuvent couvrir l'ensemble du chevelu hydrographique d'une part, et de proposer d'éventuelles actions de

gestion à l'échelle de ses bassins versants d'autre part. A ce sujet, de nombreux modèles sont depuis toujours développés. Parmi ces modèles, figurent les réseaux de neurones artificiels (RNA). La parcimonie et la rapidité de cet outil statistique ont fait de lui un puissant outil de modélisation dans pratiquement tous les domaines (Heffernan et al., 2010 ; Huo et al., 2013 ; Mandal et al., 2015 ; Xu et al., 2015). Plusieurs variantes des RNA existent, dont le perceptron multicouche (PMC). A l'instar des autres RNA, le PMC permet l'optimisation, le contrôle et la prédiction des tâches en fonction des scénarios. Il établit des relations entre des variables dites « paramètres d'entrée » et d'autres variables dites « paramètres de sortie ». Il se caractérise par sa topologie et son fonctionnement (Aichouri et al., 2015 ; Yao, 2011 ; Zhang et al., 2003). La capacité du PMC à modéliser n'importe quel phénomène complexe tel que les problèmes environnementaux n'est plus à démontrer (Shouliang et al., 2013 ; Ma et al., 2014). Cependant, la bonne prédiction des scénarios par le PMC dépend du choix des paramètres d'entrée. Ainsi, est-il fait recours à d'autres outils statistiques. Cette situation conduit à la formation de modèles hybrides.

L'un des outils statistique utilisé dans ce genre de situation est l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP est un outil d'analyse de données qui permet d'expliquer la structure des corrélations ou des covariances en utilisant des combinaisons linéaires des données originelles. Son utilisation permet de réduire et d'interpréter les données sur un espace réduit. Ce processus consiste à construire de nouveaux caractères synthétiques, obtenus par combinaisons linéaires des variables originelles,

indépendants les uns des autres. Ces caractères synthétiques définissent un nouveau système d'axes appelé « composantes principales ». A partir des diagrammes de dispersion des individus et des variables, le pourcentage d'information initiale expliqué par chaque composante principale, et la qualité de la représentation des variables illustratives grâce au cosinus des angles formés par le vecteur des variables avec les composantes des variables, il est dégagé des conclusions précises en fonction de l'étude réalisée (Tharrault et al., 2008). En plus, d'être utilisée pour le traitement des données, l'ACP est également un outil indispensable pour le suivi de certains processus et phénomènes, notamment pour la gestion des eaux de surface (Parinet et al., 2004 ; Singh et al., 2005 ; Aw et al., 2011 ; Moussa et al., 2012).

A l'instar des autres écosystèmes aquatiques ivoiriens (Kouakou et al., 2015 ; Gnonsonoro et al., 2016 ; Kadjo et al., 2016), le fleuveassandra est sujet à de nombreuses pressions anthropiques : barrages hydroélectriques, utilisation des pesticides et des fertilisants dans l'agriculture, rejets ponctuel et/ou diffus de débris et d'eaux usées de tous genres, etc. Ainsi, l'hydrodynamisme de ce fleuve est-il susceptible d'être modifié, de même que sa biodiversité de par sa pollution. Une partie des polluants déversés dans ce fleuve est véhiculée dans l'océan Atlantique via l'estuaire de Gaoulou. Cette situation influence l'état sanitaire de ces deux écosystèmes aquatiques. Dès lors, il importe fréquemment d'évaluer et de suivre les polluants drainés par le Sassandra dans l'estuaire de Gaoulou et l'Océan Atlantique. C'est dans ce cadre qu'Agbri et al. (2010) ont évalué le bilan de matières particulaires et dissoutes à la station hydrométrique de Gaoulou (Gaoulou pont). Cette station hydrométrique est située à environ 15 km de l'océan Atlantique. Elle est considérée comme l'exutoire du bassin versant du fleuve Sassandra car elle intègre 94% de sa superficie. Ce fait justifie son choix pour l'évaluation globale des quantités de polluants

que draine le fleuve Sassandra vers l'océan Atlantique par les différentes études.

Cette étude, s'inscrivant dans ce même contexte, porte sur la modélisation de l'évolution spatio-temporelle du fer à Gaoulou ; et cela par le biais du modèle hybride « ACP-PMC ». L'objectif générale d'une telle étude repose essentiellement sur la recherche des modèles du PMC traduisant au mieux le comportement du fer dans le temps et l'espace à Gaoulou.

MATÉRIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant du fleuve Sassandra est situé entre 5° et 9° 50 de latitude Nord, et 6° 50 et 8° de longitude Ouest. Sa superficie est estimée à 75 000 km² dont 8000 km² sont situés hors du territoire ivoirien (Figure 1). Il comporte une zone forestière au Sud et au Centre, et une zone de savane au Nord. Le contexte géologique du bassin versant est dominé par les roches libériennes (migmatites et gneiss) et des granitoïdes éburnéens : granites, granodiorites. La partie sud est constituée de formations à texture plus schisteuses qui sont des migmatites à biotite. La couverture pédologique, à dominante ferrallitique, est plus ou moins saturée et indurée (Agbri et al., 2010).

Le bassin versant du Sassandra subit de fortes pressions anthropiques notamment : les pratiques culturales, la présence de barrages hydroélectriques, les rejets de débris et eaux usées de tous genres. Toutes ces pressions anthropiques peuvent avoir d'énormes conséquences, particulièrement sur l'érosion et la dégradation de la qualité des ressources en eau (Adamiade, 2004). Tel est aussi le cas de l'estuaire de Gaoulou (5,042 N, -6,1503 W et à 10 au-dessus du niveau de la mer), caractérisé par la présence de son parc naturel riche en flore et faune, tant aquatique que terrestre ; mais aussi de l'Océan Atlantique au niveau de la ville de Sassandra où une partie des polluants charriés par ce fleuve atterrissent.

Choix des paramètres d'entrée du PMC par l'ACP

Le choix des paramètres d'entrée du PMC par l'ACP s'est fait en deux étapes consécutives. La première étape a constitué à une présélection de ces paramètres à partir d'une analyse qualitative ou arbitraire des résultats de l'ACP suivant la projection sur le plan 2D des différents variables utilisées dans cette étude. Cette situation se traduit par la considération de la position de la composante principale du fer avec celles des autres variables relativement aux axes de projections. Ainsi, les composantes principales des variables à proximité de celle du fer par rapport à l'un des axes de projection du plan 2D, sont-ils susceptibles d'influer la dynamique du fer dans cet estuaire. La deuxième étape, conduisant au choix définitif des paramètres d'entrée parmi ceux présélectionnés dans la première étape, est consacrée à la littérature scientifique et à l'interprétation quantitative des résultats de l'ACP.

La base de données utilisée à ce fait a été composée de douze variables les teneurs en ions majeures (SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Na^+ , Mg^{2+}), le pH, la conductivité (Cond), le dioxyde de silicium (SiO_2), le débit mensuel du fleuve Sassandra (Débit mensuel), la pluviométrie mensuelle à la station hydrométrique de Gaoulou (Pluviométrie), le fer (Fe) et le manganèse (Mn) et de 301 individus ; soit une base de 3612 données.

Utilisation du PMC et validation des modèles obtenus

Dans cette étude, deux scénarios de modélisation ont été abordé : la modélisation statique du fer et la modélisation dynamique du fer. La modélisation statique est consacrée aux variations spontanées du fer, tandis que celle liée à sa dynamique se réfère à ses variations mensuelles. Pour la modélisation statique, il a été utilisé comme paramètres d'entrée ceux retenus à l'issue de l'ACP. Pour celle portée sur la dynamique, il a été adjoint le paramètre temps (Mois) aux paramètres d'entrée utilisés pour la modélisation statique. Le paramètre temps (mois) a été codé entre 1 et 12 avec le code 1 pour le mois de Janvier,

ainsi de suite jusqu'au mois de Décembre ayant le code 12.

Le développement et le choix des modèles du PMC ont été fait conformément à ceux de Yao (2011). La principale condition de validation des modèles choisis repose sur l'erreur moyenne relative de déviation. En effet, l'erreur moyenne de déviation ($\Delta(\%)$) entre les valeurs expérimentales du fer (Y_{obs}) et celles prédites par le modèle (Y_{pr}) lors du test doit être inférieur à 10% tel recommandé par Noumi (2004). Elle s'obtient selon (1) :

$$\Delta(\%) = \frac{100}{N} \times \sum_1^N \left| \frac{Y_{pr} - Y_{obs}}{Y_{obs}} \right| \quad (1)$$

avec : N nombre d'échantillons dans la base de données du « test ».

Cependant, pour une meilleure expression des modèles obtenues d'autres conditions sont adjointes à la première. Ainsi, les modèles sont-ils finalement validés si en plus de la satisfaction de la première condition établie ci-dessus, les conditions suivantes le sont également, à savoir :

- Le taux de détermination lors de la phase de validation (R^2_{val}) doit être supérieur 0,5 (Yao, 2011), en d'autres termes si le modèle traduit à plus de 50% le phénomène étudié lors de la phase de validation;
- la moyenne carré des erreurs (MCE) et la racine de la moyenne carré des erreurs (RMCE) lors de la phase de test doit être relativement très faible ;
- l'erreur moyenne de prévision (e_m) entre les valeurs du fer obtenues expérimentalement (Y_{obs}) et celles prédites (Y_{pr}) par le modèle lors du test doit être relativement très faible. Cette erreur est calculée suivant (2) :

$$e_m = \frac{\sum_1^N |Y_{pr} - Y_{obs}|}{N} \quad (2)$$

avec : N nombre d'échantillons dans la base de données du « test ».

Source des données

Les données exploitées dans cette étude ont été obtenues par Agbri et al. (2010) sur la période de Janvier à Décembre 2003 à la station hydrométrique de Gaoulou.

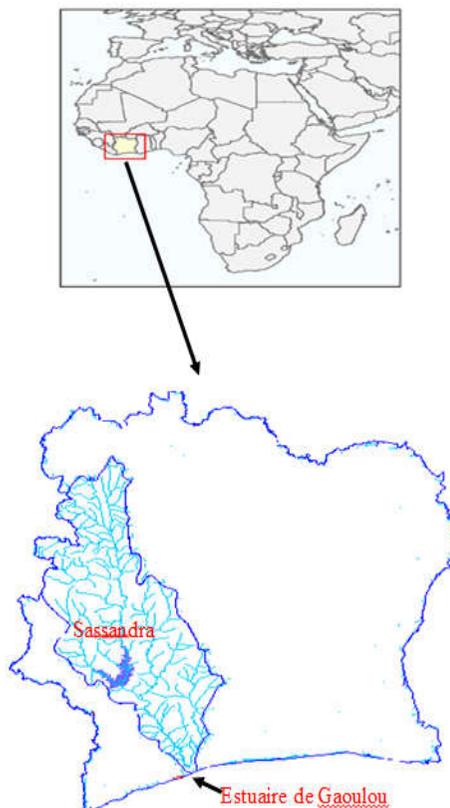


Figure 1 : Bassin versant du fleuve Sassandra.

RÉSULTATS

Choix des paramètres pertinents par l'ACP dans cette étude

Afin de porter un choix sur les paramètres d'entrée du PMC avec l'ACP, il est nécessaire d'analyser au préalable les résultats issus de l'ACP.

L'analyse de la Figure 1 montre que l'ACP exprime moyennement (55,96%) l'information issus des 12 variables. Le premier axe, correspondant à la plus forte valeur propre (4,142250), représente environ 34,52% de la variance totale. Quant au second axe, associé à la seconde valeur propre (2,572292), il la représente à environ 21,44%.

Le premier axe est fortement corrélé négativement aux variables SO_4^{2-} ($r = -0,83$; $\text{Cos}^2 = 0,70$), Mg^{2+} ($r = -0,97$; $\text{cos}^2 = 0,88$), Cond ($r = -0,75$; $\text{cos}^2 = 0,56$), K^+ ($r = -0,55$, $\text{cos}^2 = 0,3$) et Débit ($r = -0,72$; $\text{cos}^2 = 0,53$) ; et corrélé positivement avec le pH ($r = 0,90$;

$\text{cos}^2 = 0,81$) (Tableau 1). Cet axe traduirait les conditions d'évolution biogéochimique des sulfates, du magnésium et du potassium. La présence du magnésium dans les eaux de l'estuaire est favorisée par la croissance de la conductivité ($r = 0,70$) et du débit ($r = 0,74$) ; mais défavorisée par la croissance du pH ($r = -0,86$). Les sulfates y diminuent avec la croissance du pH ($r = -0,70$). La présence du magnésium et le potassium est favorisée par celle des sulfates ($r = 0,73$ avec Mg^{2+} , $r = 0,64$ avec K^+) (Tableau 2). Le second axe présenterait une forte corrélation négative avec Na^+ ($r = -0,87$; $\text{cos}^2 = 0,78$), Cl ($r = -0,84$; $\text{cos}^2 = 0,78$) et la pluviométrie ($r = -0,85$; $\text{cos}^2 = 0,72$) (Tableau 1). Cet axe exprimerait les conditions hydrochimiques à l'estuaire de Gaoulou. En effet, tout porte à croire que la pluviométrie, en plus de l'apport des ions Na^+ et Cl⁻ par lessivage, y favoriserait la remise en solution des dépôts de NaCl

faites par les eaux marines lors de la saison d'étiage du Sassandra. Cette situation l'est surtout pour le sodium où il est noté une corrélation positive avec la pluviométrie ($r = 0,70$).

Les paramètres présélectionnés selon le premier critère à partir de la Figure 1.a sont : le dioxyde de silicium (SiO_2), les ions sulfates (SO_4^{2-}), la conductivité (Cond), le débit mensuel du fleuve Sassandra (débit), le pH, les ions potassium (K^+), les ions magnésium (Mg^{2+}) et le manganèse (Mn). En tenant compte du deuxième critère, il est retenu finalement comme paramètres d'entrée pour le PMC dans cette étude : SiO_2 , SO_4^{2-} , Cond, le débit mensuel du fleuve Sassandra et le pH.

Modélisation du fer à partir des cinq paramètres d'entrée choisi à partir de l'ACP

Dans cette étude, la meilleure performance du PMC pour la modélisation

statique est obtenue par le modèle 5-1-1 et celle relative à la modélisation dynamique est donnée par le modèle 6-12-1. Le modèle 5-1-1 explique à 96,22% ($R^2_{\text{App}} = 0,9622$) les variations spatio-temporelles des cinq paramètres d'entrée mise jeu et prédit à 99,60% ($R^2_{\text{Val}} = 0,9960$) l'évolution statique du fer. Quant au modèle 6-12-1, il traduit à 100% ($R^2_{\text{App}} = 1,0000$) la variation spatio-temporelle des six paramètres d'entrée mise en jeu et prédit à 99,72% ($R^2_{\text{Val}} = 0,9972$) l'évolution dynamique du fer. Les différentes erreurs entre les valeurs du fer prédites par ces modèles et celles obtenues expérimentalement sont relativement très faibles (Tableau 3). En se référant aux conditions de validations établies ci-dessus, ces deux modèles sont validés. Les représentations architecturales de ces deux modèles sont données par la Figure 3. La Figure 4 donne l'évolution des valeurs expérimentales du fer en fonction de celles prédites par ces modèles.

Tableau 1 : Coordonnées factorielles basées sur les corrélations - communautés des Variables.

Variables	Corrélation (r) des variables avec les deux axes		Cosinus carré des angles des vecteurs de coordonnées factorielles	
	Fact. 1	Fact. 2	Fact 1	Fact 2
SiO_2	0,461758	0,255889	0,213221	0,278700
SO_4^{2-}	-0,834820	0,182925	0,696925	0,730387
Cl ⁻	-0,147072	-0,869711	0,021630	0,778028
Mg^{2+}	-0,936012	-0,142204	0,876118	0,896339
Na^+	0,273429	-0,837471	0,074764	0,776122
K^+	-0,548057	-0,357075	0,300367	0,427869
Fe	-0,189567	-0,069451	0,035936	0,040759
Mn	-0,166234	0,193029	0,027634	0,064894
pH	0,900412	-0,063830	0,810741	0,814816
cond	-0,746585	0,310801	0,557389	0,653986
Débit	-0,724764	-0,103798	0,525283	0,536057
Pluviométrie	-0,047366	-0,845187	0,002244	0,716585

Tableau 2 : Matrice de corrélation de Bravais-Pearson des variables.

	SiO ₂	SO ₄ ²⁻	Cl-	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Mn	pH	cond	Débit	Pluviométrie
SiO ₂	1,00											
SO ₄ ²⁻	-0,40	1,00										
Cl-	-0,34	0,15	1,00									
Mg ²⁺	-0,29	0,73	0,25	1,00								
Na ⁺	0,11	-0,48	0,55	-0,06	1,00							
K ⁺	-0,27	0,64	0,50	0,49	0,16	1,00						
Fe	-0,45	0,32	0,13	0,14	-0,17	-0,08	1,00					
Mn	-0,14	0,29	-0,11	0,04	-0,11	0,40	-0,25	1,00				
pH	0,22	-0,70	-0,01	-0,86	0,20	-0,42	-0,19	-0,05	1,00			
cond	-0,18	0,43	-0,37	0,70	-0,38	0,09	-0,06	0,07	-0,66	1,00		
Débit	-0,22	0,29	0,08	0,74	-0,05	0,09	-0,17	-0,14	-0,71	0,75	1,00	
Pluviométrie	-0,21	-0,31	0,57	0,16	0,70	0,12	0,07	-0,22	0,02	0,03	0,31	1,00

*En gras les valeurs de corrélations significatives

*Corrélations significatives marquées à p < ,05000 N=12 (Observations à VM ignorées).

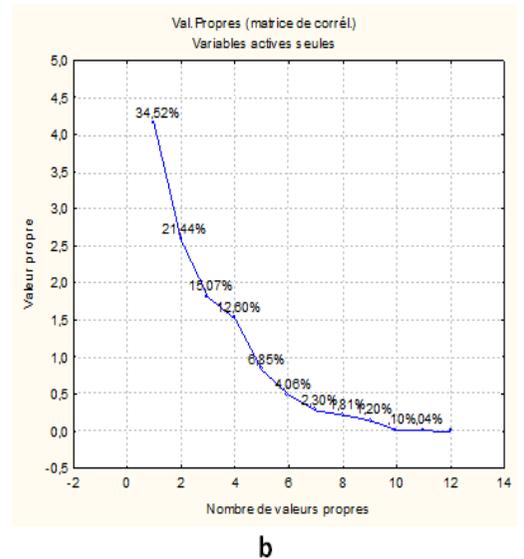
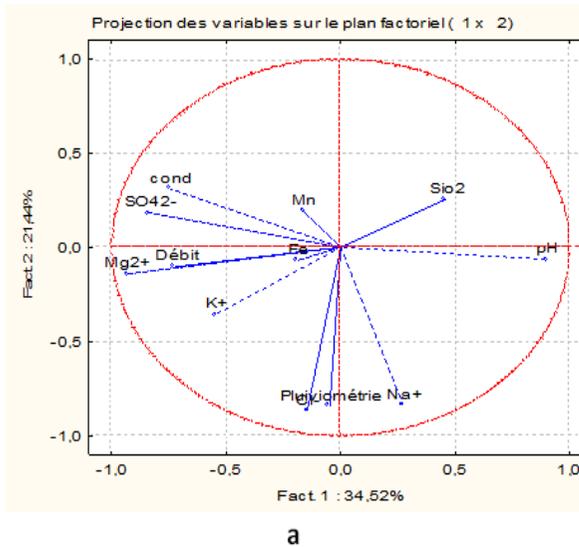


Figure 2 : Tracés des coordonnées factorielles des variables sur un plan 2D (a) et des valeurs propres (b).

Tableau 3: Caractéristiques statistiques des modèles 5-8-1 et 6-15-1.

	Modélisation statique	Modélisation dynamique
Modèle du PMC	5-1-1	6-12-1
R_{App}	0,9809	1,0000
R^2_{App}	0,9622	1,0000
R_{Val}	0,9980	0,9986
R^2_{Val}	0,9960	0,9972
MCE_{Val}	2,8392	2,1119
MCE_{test}	0,1684	0,1756
$RMCE_{test}$	0,4104	0,4190
Erreur moyenne de prévision (e_m) (%)	0,8556	0,6136
Erreur moyenne de déviation (Δ) (%)	7,516	7,0693

R_{App} : coefficient de corrélation lors de la phase d'apprentissage ; R^2_{App} : taux de détermination lors de la phase d'apprentissage ; R_{Val} : coefficient de corrélation lors de la phase de validation ; R^2_{Val} : taux de détermination lors de la phase de validation ; MCE_{Val} : moyenne carré des erreurs lors de la phase de validation ; MCE_{test} : moyenne carré des erreurs lors de la phase du test ; $RMCE_{test}$: racine de la moyenne carré des erreurs (RMCE) lors de la phase.

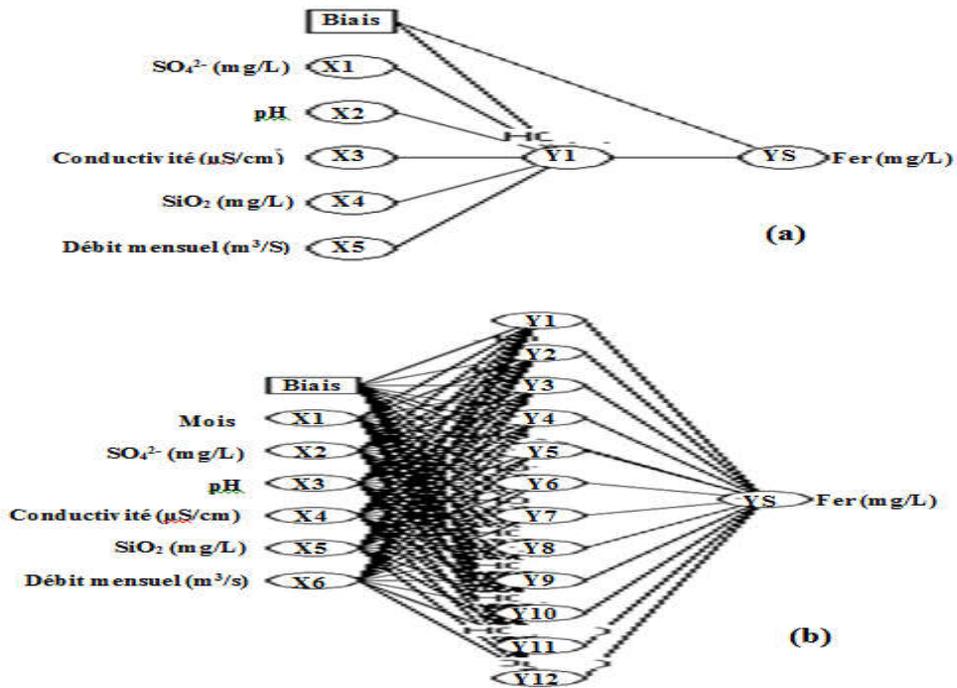


Figure 3 : Architecture des modèles 5-1-1 (a) et 6-12-1 (b).

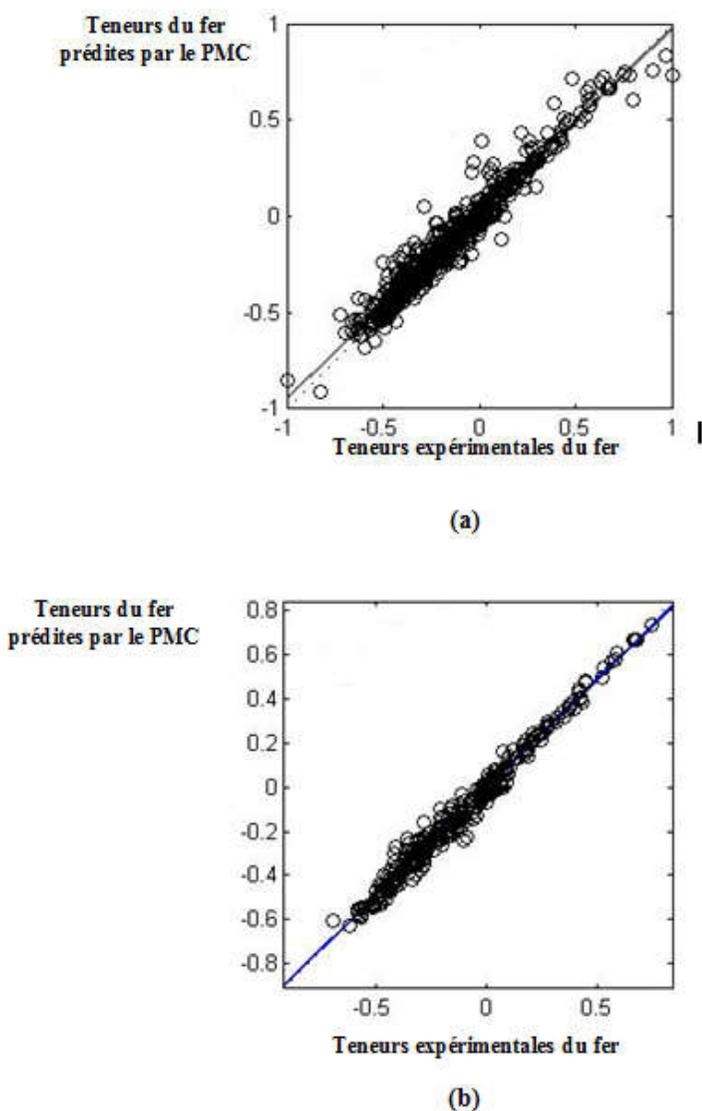


Figure 4 : Evolution des valeurs expérimentales du fer en fonction de celles prédites par les modèles 5-1-1 (a) et 6-12-1 (b).

DISCUSSION

La dynamique spatio-temporelle des éléments en trace métallique (ETM) dans les eaux de surface est fonction de multiples phénomènes. Ces phénomènes sont complexes et interagissent les uns avec les autres. De ce fait, la mise en exergue de l'influence de certains paramètres intervenant dans l'évolution spatio-temporelle des ETM dans ces écosystèmes aquatiques n'est pas toujours évident. Tel est le cas du fer dans

cette étude, qui en se référant aux résultats obtenus par l'application de l'ACP à la base de données utilisée, ne semble être en interaction avec tous les autres paramètres. Pour un meilleur choix des paramètres d'entrée pour le PMC, il a été nécessaire de réaliser une approche indirecte. L'idée de force de cette démarche repose sur la considération que tous les facteurs proche de celui du fer par rapport à l'un des axes sont supposés intervenir dans la dynamique

spatio-temporelle de ce métal d'une part, et les paramètres interagissant avec l'évolution de Mg^{2+} , K^+ et du Mn sont susceptibles d'influer celui du fer. Sur cette base, il a été retenu finalement SiO_2 , la conductivité, SO_4^{2-} , le pH et le débit mensuel du fleuveassandra.

Le choix définitif de ces paramètres s'est fait sur des considérations scientifiques. En effet, SiO_2 est associé à de nombreux métaux tels que Ca, Fe, Mn, Na, etc., dans le manteau et la croûte terrestre (Rudnick et Gao, 2005). De ce fait, le lessivage des bassins versants des eaux de surface par les eaux météorites et son largage et/ou relargage à partir des sédiments, SiO_2 se retrouve dans les eaux de surface. Il l'est également à partir de la décomposition des organismes vivants. De ce fait, la dynamique de ce paramètre à Gaoulou expliquerait celui du fer. Quant à SO_4^{2-} , il est naturellement dans le manteau et la croûte terrestre trouvée sous forme de baryte ($BaSO_4$), d'epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) et de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Ils se retrouvent dans les eaux de surface par diverses voies notamment à partir des rejets anthropiques, par le lessivage des sols par les eaux météorites, par l'oxydation du sulfure d'hydrogène issu de l'air et/ou libérée par les sédiments dans les conditions anoxiques. La libération du sulfure d'hydrogène par les sédiments s'accompagne de celui de certains métaux dont le fer (Yao, 2011). La forte corrélation observée dans cette étude entre SO_4^{2-} et Mg^{2+} montrerait que l'essentiel des sulfates à Gaoulou serait d'origine terrigène. Dans ces eaux, la dynamique de SO_4^{2-} fournirait des renseignements sur celui du fer, soit à partir des apports issus du lessivage du bassin versant, soit à partir du largage et/ou du relargage du fer en même temps que celui du sulfure. Concernant le pH et la conductivité, il est à noter que le pH joue un rôle fondamental dans les processus liés à la dynamique des ETM dans les eaux de surface, tandis que la conductivité permet de renseigner sur leur état libre dans ces

écosystèmes. Aux embouchures des fleuves tropicaux, l'augmentation du pH des eaux serait due essentiellement au fait de la remontée des eaux marines dans ces fleuves ; et cela en saison d'étiage. En revanche, une baisse de leur pH serait liée essentiellement aux apports continentaux, notamment en saison de crue (Kouassi, 2005). Dans cette étude, il est noté qu'une augmentation du pH défavorise la présence de SO_4^{2-} et de Mg^{2+} dans ces eaux. Par contre, une croissance de la conductivité y favorise leur présence, surtout celle de Mg^{2+} . Le pH et la conductivité, évoluant saisonnièrement en contre sens à Gaoulou, montreraient que la remontée des eaux marines en saison d'étiage y favoriserait la sédimentation des ETM, particulièrement celle du magnésium. En période de crue, les apports en eaux continentales du fleuveassandra enrichiraient ces eaux en éléments minéraux et en ETM ; mais aussi favoriserait un relargage de ces composés par les sédiments. Ainsi, le débit mensuel de cours d'eau est-il d'une importance dans la dynamique des ETM à Gaoulou, précisément dans celui du fer.

Les modèles 5-5-1 et 6-12-1, traduisant à plus 95% les évolutions spatio-temporelles des différents paramètres d'entrée mise en jeu et prédisent à plus de 99% respectivement les évolutions statique et dynamique du fer à Gaoulou, montrent la pertinence des paramètres d'entrée choisis à partir de l'ACP. Une telle performance du modèle hybride neural « ACP-PMC » a été déjà mise en exergue par Yao (2011) dans le cadre la modélisation de l'eutrophisation. Dès lors, le modèle hybride « ACP-PMC » est d'une acuité dans la modélisation de n'importe quels phénomènes aussi complexes que ce soient. Pour illustration, les résultats obtenus dans cette étude sont meilleurs que bon nombre d'autres modèles hybrides utilisés pour la modélisation des fléaux écologiques tels que l'eutrophisation, notamment celui de « Back propagation and

rough decision » de Wang et al. (2010) et le modèle hybride « ARIMA » de Zhang (2003).

Conclusion

Ce travail a permis de montrer la capacité du modèle hybride « ACP-PMC » à modéliser les phénomènes aussi complexes tels que l'évolution spatio-temporelle du fer dans les eaux de surface, particulièrement à Gaoulou. Ces résultats, jugés très satisfaisants, peuvent servir d'outil pour le suivi du fer dans cet écosystème. L'utilisation de ce modèle hybride doit être étendu à d'autres formes de pollution pour la gestion et la protection durable du fleuveassandra et de l'océan Atlantique au niveau de la ville de Sassandra.

CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêts pour la publication de cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

YMK a réalisé les différentes modélisations à partir du perceptron multicouche, interprété les résultats et participé à la rédaction de cet article. LA a fourni les données, suivi le cadre hydrologique dans le choix des paramètres d'entrée pour le et participé à la rédaction de cet article. BSB a contribué à la fourniture des données, à la contribution de la revue scientifique par rapport à l'influence des ions majeurs dans la dynamique du fer dans les eaux de surface et participé à la rédaction de cet article. BMS et AT ont réalisés le traitement des données à l'ACP et l'interprétation des résultats qui y découlent, mais aussi participés à la rédaction de cet article.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à la Direction de la Météorologie Nationale de la SODEXAM et à la Direction de

l'Hydraulique humaine qui ont bien voulu mettre à notre disposition respectivement les données pluviométriques couvrant la zone d'étude et les débits du fleuve Sassandra relevés à la station hydrologique de Gaoulou pont. Ils sont également adressés au Professeur Issiaka SAVANE et au Docteur Inza DOUMOUYA, du Laboratoire Géosciences et Environnement (LGE) de l'UFR Sciences et Gestion de l'Environnement (SGE) (Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire), pour leurs aides et conseils avisés.

RÉFÉRENCES

- Aichouri I, Hani A, Bougherira N, Djabri L, Chaffai H, Lallahem S. 2015. River flow model using artificial neural networks. *Energy Procedia*, **74**: 1007–1014.
- Ajonina GN, Dibong SD, Seth RE, Gah-Muti Y, Ndinga NE, Nkomba A. 2015. Revenus économiques et pollution écosystémique liés au transport des personnes et des biens traversant les mangroves de l'estuaire du Wouri (Douala, Cameroun). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **9**(4): 1851-1862.
- Adamiade VC. 2004. Influence d'un fossé sur les écoulements rapides au sein d'un versant. Thèse de spécialité, Université Pierre et Marie Curie, Paris, p.216.
- Agbri L, Bamba SB, Doumouya I, Savané I. 2010. Bilan des flux de matières particulières et dissoutes du Sassandra à Gaoulou pont (Côte d'Ivoire). *Sci. & Nat.*, **7**(2): 107–118.
- Aw S, N'goran EBZ, Siaka S, Parinet B. 2011. Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). *J. Appl. Biosci.*, **38**: 2573 – 2585.
- Bennet EM, Carpenter SR, Caraco NF. 2001. Human Impact on Erodible phosphorus and Eutrophication: A global

- perspective. *Biosci.*, **51**: 227-234.
- Gnonsoro UP, Yao KM, Yao BL, Kouassi NLB, Dembele A, Métongo SB, Kouassi AM, Trokourey A. 2016. Aldicarbe et crimidine dans les eaux et les sédiments aux alentours de la décharge municipale d'Akouédo (Abidjan, Côte d'Ivoire) : niveaux et fréquences de contamination. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(1): 400-411.
- Goody DC, Lapworth DJ, Bennett SA, Heaton THE, Williams PJ, Surridge BWJ. 2016. A multi-stable isotope framework to understand eutrophication in aquatic ecosystems. *Water Res.*, **88**: 623-633.
- Heffernan JB, Liebowitz DM, Frazee TK, Evans JM, Cohen MJ. 2010. Algal blooms and the nitrogen-enrichment hypothesis in Florida spring: evidence, alternatives and adaptive management. *Ecol. Appl.*, **20**: 816-829.
- Huo S, He Z, Su J, Xi B, Zhu C. 2013. Using artificial neural network models for eutrophication prediction. *Procedia Environ. Sci.*, **18**: 310-316.
- Kadjo V, Ethchian OA, Blé CM, Soro D, Yapi J-N, Otchoumou A. 2016. Caractérisation de la pêche aux crevettes d'eau douce Atyascabra (Leach, 1815) (Decapoda: Atyidae) dans la rivière Bia, Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(2): 620-631.
- Kaspersen BS, Christensen TB, Fredenslund AM, Møller HB, Butts MB, Jensen NH, Kjaer T. 2016. Linking climate change mitigation and coastal eutrophication management through biogas technology: Evidence from a new Danish bioenergy concept. *Sci. Total Environ.*, **541** : 124-1131.
- Kouassi AM. 2005. Hydrochimie et qualité des eaux des lagunes Ebrié et de Grand-Lahou de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, p.162.
- Kouakou R, Kouassi AM, Kwa-Koffi EK, Gnonsoro UP, Trokourey A. 2015. Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in a tropical coastal lagoon (Grand-Lahou lagoon, Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **9**(2): 1120-1129.
- Ma Z, Song X, Wan R, Gao L, Jiang D. 2014. Artificial neural network modeling of the water quality in intensive Litopenaeus vannamei shrimp tanks. *Aquac.*, **433**: 307-312.
- Mandal S, Mahapatra SS, Patel RK. 2015. Enhanced removal of Cr(VI) by cerium oxide polyaniline composite: Optimization and modeling approach using response surface methodology and artificial neural networks. *J. Environ. Chem. Eng.*, **3**(2) : 870-885.
- Moussa AB, Chahlaoui A, Rour El H. 2012. Évaluation de la pollution physico-chimique des eaux de l'Oued Khoumane (Moulay Idriss Zerhoun, Maroc). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **6**(6): 7096-7111.
- Noumi M. 2004. Painleve equations through symmetry. Monographs vol. 223: American Mathematical Society.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé). 2004. Directive pour la qualité de l'eau de boisson (3^{ème} edn) : OMS.
- Parinet B, Lhote A, Legube B. 2004. Principal component analysis: an appropriate tool water quality evaluation and management-application to a tropical lake system. *Ecol. Model.*, **178**: 295-311.
- Rudnick RL, Gao S. 2005. Composition of the crust. In *Treatise on Geochemistry, the Crust* (vol. 3). Elsevier; 48-53.
- Singh KP, Malik A, Sinha S. 2005. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariable statistical technics- a case study. *Analytica Chimica Acta*, **538**: 355-374.

- Shouliang H, Zhuoshi H, Jing S, Beidou X, Chaowei Z. 2013. Using artificial neural network models for eutrophication prediction. *Procedia Environ. Sci.*, **18**: 310-316.
- Tharrault Y, Mourot G, Ragot J, Maquina DE. 2008. Fault detection and isolation with robust principal component analysis. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, **18**(4): 429-442.
- Ulrich AE, Malley DF, Watts PD. 2016. Lake winnipeg basin: Advocacy, challenges and progress for sustainable phosphorus and eutrophication control. *Sci. Total Environ.*, **542**(B): 1030-1039.
- Wang Z, Huang K, Zhou P, Guo H. 2010. A hybrid neural network model for cyanobacteria bloom in Dianchi Lake. *Int. Soc. Environ. Inf. Sci. 2010. Annual Conference (ISEIS)*.
- Xu Y, Ma C, Liu Q, Xi B, Qian G, Zhang D, Huo S. 2015. Method to predict key factors affecting lake eutrophication – A new approach based on Support Vector Regression model. *Int. Biodeterior. & Biodegrad.*, **102**: 308-315.
- YAO MK. 2011. Evaluation et modélisation de l'eutrophisation dans une baie lagunaire tropicale apparentée lacustre : cas de la baie lagunaire de Tiagba (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, p. 242.
- Zhang GP. 2003. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, **50**: 159-175.