

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique d'Alger
Département du Génie de l'Environnement

Laboratoire des Biotechnologies Environnementales
& de Génie des Procédés (BIOGEP)

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté par :
Mr MAZOUZI Chouaib

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE
DE L'ENVIRONNEMENT**

THÈME

**Etude et modélisation de la pollution atmosphérique
de la région de Draria**

Soutenu le : 20/06/2013 devant le jury suivant :

Président :	Mr.	N. MAMERI	Professeur à l'ENP
Examinatrice:	M ^{me}	N. ABDI	Professeur à l'ENP
Promoteurs:	Mr M ^{me}	H. LOUNICI Z. KHODJA	Professeur à l'Université de Bouira Attachée de recherche au CRND
Invité:	Mr	A. BOUKADOUM	Directeur au sein du Ministère de l'Environnement et l'Aménagement du territoire

PROMOTION 2012/2013
ENP. 10, Avenue Hassen-Badi, El Harrach, Alger

Dédicace

A ma mère en témoignage de mon affection et mon admiration, pour son courage et sa patience et à qui je ne trouverai jamais les mots pour qualifier cette étoile et à qui je ne saurai jamais exprimer toute ma reconnaissance...

A mon père qui m'a tout donné et qui a su avec de ses précieux conseils m'inspirer le sens de la dignité, le courage et le travail sans rebrousser chemin, qu'il trouve ici l'accomplissement de tous ses vœux...

A mes sœurs, Imene et Khaoula, à qui je souhaite tellement de succès et de réussites, bonne chance dans votre vie, que la vie vous sourira.

A tout les enseignants qui ont participés de loin ou de prêt à ma formation.

A tous mes amis, O. T. Fellahi, C. Babanna, amies et camarades en témoignages de mes plus profondes amitiés et ma sincère sympathie.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et à ceux qu'ils pensaient que je ne serai jamais un Ingénieur d'Etat.

Mazouzi Chouaib

Remerciements

Dieu merci de m'avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce mémoire. Merci de m'avoir aidé de manière irréprochable à affranchir les nombreux obstacles dressés dans mon chemin, merci de m'avoir donné la détermination quand tout semblaient perdus. Merci pour votre protection et pour les nombreux signes que vous me les avez envoyé.

Je tiens à remercier vivement Madame Z. Khodja, qui en tant que promotrice au Centre de Recherche Nucléaire de Draria, d'avoir accepté d'encadrer ce travail, pour tous les précieux conseils qu'elle m'a donné, pour sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire et pour l'aide et le temps qu'elle a bien voulu me consacrer.

Je tiens également à remercier Mr H. Lounici, en tant que promoteur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour son oreille attentive qu'il m'a toujours accordé, pour sa confiance et de m'avoir orienté vers le chemin de la recherche scientifique.

Mes sincères remerciements à Mr M. Mouzaï, attaché de recherche au Centre de Recherche Nucléaire de Draria, pour son aide et de m'avoir éclairci la Technique d'Analyse par Activation Neutronique. Je remercie vivement toute l'équipe du CNRA.

J'oublierai jamais de remercier mon cher ami M. K. Ferkha, pour son aide, son amitié, sa disponibilité et pour ses précieux conseils et surtout pour son esprit créatif et de son sens de l'écoute.

Je tiens aussi à remercier vivement :

Monsieur N. Mammeri, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, de m'avoir consacré de son temps pour présider les membres de jury, de juger ce travail et pour sa remarquable pédagogie.

Madame N. Abdi, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, qui m'a accompagné durant trois ans de cursus avec son savoir, sa modestie et d'être parmi les membres de jury et de me faire l'honneur d'examiner ce travail.

Monsieur A. Boukadoum, Directeur au sein du Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, d'avoir accepté mon invitation.

Liste des abréviations (par ordre alphabétique)

A	Activité.
AAN	Analyse par Activation Neutronique.
ACP	Analyse en Composantes Principales.
ARMA	Auto Régressive Moyenne Average.
BR	Régularisation bayésienne.
C_e	Concentration de l'élément dans l'échantillon (ng/m^3).
C_s	Concentration de l'élément dans le standard ($\mu\text{g}/\text{g}$ de standard).
CP	Composante principale.
C^{st}	Constante.
d_B^F	Nombre d'atome formé.
dt	Intervalle de temps d'irradiation.
d_B^D	Nombre d'atome de B désexcité.
ETM	Eléments de Traces Métalliques.
HP Ge	Germanium à Haute Pureté.
I	L'abondance isotopique de l'élément (en %).
ICP/AES	Emission à plasma induit par haute fréquence.
ICP/MS	Spectrométrie de masse utilisant un plasma comme source d'ions.
L	Fonction Logsig (logarithme sigmoïde).
LED	Lissage Exponentiel Double.
LES	Lissage Exponentiel Simple.
LM	Algorithme de Levenberg-Marquardt.
m_s	Masse de l'échantillon (mg).
Max	Maximum.
Min	Minimum.
Ml.élmnt	Multi élémentaire
Mn.élmnt	Mono élémentaire.
Moy	Moyenne.
N_0	Nombre d'atome cible.
N^*	Le nombre de noyau radioactif.
N_A	Nombre d'Avogadro ($N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ atomes/mole).
N_B	Nombre d'atome de B présent à l'instant t .
$N_e(0)$	Nombre total d'atomes radioactifs d'un élément dans l'échantillon.
$N_s(0)$	Nombre total d'atomes radioactifs d'un élément dans le standard.
NET	Surface d'un pic.
NET_e	Net de l'élément dans l'échantillon.
NET_s	Net de l'élément dans le standard.
Obs	Observation.
OMS	Organisation mondiale de la santé.
P	Fonction Purelin (linéaire).
PIXE	Particle-induced X-Ray Emission.
PM_i	Particule de $i \mu\text{m}$ de diamètre aérodynamique.
RNA	Réseau de Neurones Artificiels.

SAA	Spectre d'Adsorption Atomique.
T	Fonction Tansig (tangent sigmoïde).
t	Temps de décroissance radioactive.
t_i	Le temps d'irradiation de l'échantillon (seconde).
t_d	Le temps de décroissance radioactive (seconde).
t_{de}	Temps de décroissance de l'élément dans l'échantillon (s).
t_{ds}	Temps de décroissance de l'élément dans l'échantillon (s).
TSP	Particules Totale en Suspension.
V	Volume d'air aspiré (m^3).
$W_{i,j}$	Poids de connexion entre le neurone i et le neurone j .
x	Abscisse réelle.
x^*	Abscisse simulée.
\bar{x}	Moyenne des abscisses.
y	Ordonnée réelle.
y^*	Ordonnée simulée.
\bar{y}	Moyenne des ordonnées.
ω	Constante du lissage.
ε	Terme d'erreur.
ν	Valeur propre.
σ	Variance.
σ_{AB}	Section efficace (probabilité d'incidence en barns).
Φ_{AB}	Flux ou débit de particules incidentes ($neutrons.cm^{-2}.s^{-1}$).
λ	Constante de désintégration.

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Lapollution atmosphérique

I- 1- Composition de l'air.....	5
I- 2- La pollution de l'air.....	5
I- 2- 1- Origine de la pollution de l'air	5
I- 2- 2- Principaux polluants : sources et effets	6
I- 2- 2- 1- Oxydes d'azotes (NO_x).....	6
I- 2- 2- 2- Monoxyde de carbone (CO).....	6
I- 2- 2- 3- Dioxyde de carbone (CO_2).....	6
I- 2- 2- 4- Dioxyde de soufre (SO_2)	6
I- 2- 2- 5- Composés organique volatiles (COV).....	6
I- 2- 2- 6- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	7
I- 2- 2- 7- Chlorofluorocarbure (CFC)	7
I- 2- 2- 8- Hydrofluorocarbures (HFC).....	7
I- 2- 2- 9- Ozone troposphérique (O_3)	7
I- 2- 2- 10- Les particules	7
I- 2- 2- 11- Les Eléments Traces Métalliques.....	9
I- 3- Normes et réglementation	11
I- 4- Méthode d'échantillonnage.....	12
I- 4 -1- Le choix du site de prélèvement.....	12
I- 4 -2- Le choix du filtre	13
I- 4 -2- 1- Filtre en fibre de verre.....	13
I- 4 -2- 2- Filtres membranaires.....	13

Chapitre II : Analyse des ETM : Technique d'Analyse par Activation Neutronique

II- 1- Méthodes d'analyse des ETM.....	16
II- 2- L'analyse par activation neutronique.....	17
II- 2- 1- Les réaction nucléaires.....	17
II- 2 -2- Activation (irradiation)	18
II- 2 -3- Isolement.....	18
II- 2 -3- 1- Effet photoélectrique.....	18
II- 2 -3- 2- Effet Compton.....	19
II- 2 -3- 3- Production de paire	19
II- 2 -4- Quantification	19
II- 3- Sources de neutrons	20

II- 3 -1- Sources isotopiques de neutrons	20
II- 3 -2- Les accélérateurs	20
II- 3 -3- Les réacteurs nucléaires	20
II- 4- Équations fondamentales de l'activation neutronique:	21
II- 4- 1- La méthode absolue :	23
II- 4- 2- La méthode relative :	23
II- 5- Avantages de la NAA :	24
II- 6- Limites de la NAA	24

Chapitre III : La modélisation

III- 1- Régression et ajustement	29
III- 2- Analyse en Composantes Principales	30
III- 2-1- Notion d'individus et observations	31
III- 2-2- Principe de l'ACP	31
III- 2-2-1- Interprétation de la représentation graphique	32
III- 3- Modélisation par les réseaux de neurones artificiels	33
III- 3-1- Avantages des RNA	36
III- 3-2- limites des RNA	36
III- 3-3- Architecture des RNA	37
III- 3-4- Les poids des connexions	37
III- 3-5- Les fonctions de transfert	37
III- 3-6- L'apprentissage	38
III- 3-6-1- Algorithmes d'apprentissage	39
III- 3-6-1-1- <i>Algorithme de Levenberg-Marquardt</i>	39
III- 3-6-1-2- <i>Régularisation bayésienne</i>	40
III- 3-7- Fonction de coût.	41
III- 3-7-1- La rétropropagation de l'erreur	41
III- 3-8- La mise en œuvre d'un réseau de neurone	44
III- 4- Modélisation des séries temporelles	44
III- 4- 1- L'autocorrélation.	45
III- 4- 2- Le lissage exponentiel simple	45
III- 4- 3- Le lissage exponentiel double	46
III- 4- 4- Modélisation par le modèle ARMA	47

Chapitre IV : Méthodologie expérimentale

Description de la zone d'étude	49
IV- 1- Matériels	49
IV- 1- 1- Dispositif d'échantillonnage	49
IV- 1- 2- Etude des TSP	53

IV- 1- 3- Etude des ETM associés aux TSP	53
IV- 1- 3- 1- Le réacteur NUR de Drarïa	53
IV- 1- 3- 2- La chaine de spectrométrie gamma	54
IV- 2- Méthodes	55

Etudes des TSP et des ETM associés

IV- 2- 1- Echantillonnage	55
IV- 2- 2- Etude des TSP	55
IV- 2- 3- Etude des ETM associés aux TSP	56
IV- 2- 3- 1- Conditionnement des échantillons pour l'AAN	56
IV- 2- 3- 2- L'irradiation	57
IV- 2- 3- 3- Décroissance radioactive des échantillons irradiés	58
IV- 2- 3- 4- Etalonnage de la chaine de spectrométrie gamma	58
IV- 2- 3- 5- Acquisition des données d'irradiation	58
IV- 2- 3- 6- Analyse qualitative des ETM	59
IV- 2- 3- 7- Analyse quantitative des ETM	59
IV- 2- 4- Calcul d'erreurs	59
IV- 2- 4- 1- Equation d'erreurs sur les TSP	59
IV- 2- 4- 2- Equation d'erreurs sur les ETM	60

Modélisation des TSP et des ETM associés

IV- 2- 5- La chronologie des observations	61
IV- 2- 6- Identification des entrées des modèles	61
IV- 2- 7- Création des modèles.....	62
IV- 2- 7- 1- Modélisation par LED	62
IV- 2- 7- 2- Modélisation par le modèle ARMA	63
IV- 2- 7- 3- Modélisation par les réseaux de neurones.....	64
IV- 2- 8- Calcul d'erreur sur les modèles	66
IV- 2- 9- Critères de validation d'un modèle	67
IV- 2- 9- 1- Coefficient de détermination.....	67
IV- 2- 9- 2- Valeurs comprises dans la marge d'erreur	68
IV- 2- 10- Critères de comparaison	68
IV- 2- 11- La Prévision des TSP	68
IV- 2- 12- Prévision des ETM associés aux TSP	70
IV- 2- 13- Vérification de la fiabilité et exploitation des modèles.....	71

Chapitre V : Résultats et discussions

Etudes des TSP et des ETM associés au niveau de Drarïa

V- 1- Etude des TSP.....	74
V- 2- Etude des ETM associés aux TSP	75
V- 2- 1- Cérium (Ce)	76
V- 2- 2- Sodium (Na) et Fer (Fe).....	77
V- 2- 3- Brome (Br) et Chrome (Cr)	78
V- 2- 4- Samarium (Sm) et Cadmium (Cd).....	79

V- 2- 5- Lanthane (La) et Antimoine (Sb).....	79
V- 2- 6- Gadolinium (Gd) et Sélénium (Se).....	80
V- 2- 7- Ytterbium (Yb) et Hafnium (Hf).....	81
V- 2- 8- Scandium (Sc) et Cobalt (Co).....	81
V- 2- 9- Molybdène (Mo) et Arsenic (As).....	82
V- 2- 10- Strontium (Sr) et Zinc (Zn).....	83
V- 2- 11- Europium (Eu) et Césium (Cs).....	84
V- 3- Comparaison des ETM quantifiés au niveau de Drarïa avec autres villes mondiales.....	84
Modélisation des TSP et des ETM associés au niveau de Drarïa	
V- 4- La chronologie des observations.....	86
V- 5- Modélisation par lissage exponentiel double (LED).....	86
V- 5- 1- Les TSP.....	87
V- 5- 2- Le Samarium (Sm).....	87
V- 5- 3- Le brome (Br).....	88
V- 5- 4- Le Cérium (Ce).....	88
V- 5- 5- Le Chrome (Cr).....	89
V- 5- 6- Le Scandium (Sc).....	89
V- 5- 7- L'Ytterbium (Yb).....	90
V- 5- 8- Le Lanthane (La).....	90
V- 5- 9- L'Antimoine(Sb).....	91
V- 5- 10- Le Hafnium (Hf).....	91
V- 5- 11- Le Sodium (Na).....	92
V- 5- 12- Résumé de la modélisation par LED.....	92
V- 6- Modélisation par le modèle ARMA.....	92
V- 6- 1- Les TSP.....	93
V- 6- 2- Le Brome (Br).....	93
V- 6- 3- Le Cérium (Ce).....	94
V- 6- 4- Le Chrome (Cr).....	94
V- 6- 5- Le Hafnium (Hf).....	95
V- 6- 6- Le Lanthane (La).....	95
V- 6- 7- Le Sodium (Na).....	96
V- 6- 8- L'Antimoine (Sb).....	96
V- 6- 9- Le Scandium(Sc).....	97
V- 6- 10- Le Samarium(Sm).....	97
V- 6- 11- L'Ytterbium (Yb).....	98
V- 6- 12- Résumé de la modélisation par le modèle ARMA.....	98
V- 7- Modélisation par les réseaux de neurones.....	99
V- 7- 1- Les TSP.....	99
V- 7- 2- Le Brome (Br).....	100
V- 7- 3- Le Cérium (Ce).....	100
V- 7- 4- Le Chrome (Cr).....	101
V- 7- 5- Le Hafnium (Hf).....	101

V- 7- 6- Le Lanthane (La)	102
V- 7- 7- Le Sodium (Na)	102
V- 7- 8- L'Antimoine (Sb).....	103
V- 7- 9- Le Scandium (Sc)	103
V- 7- 10- Le Samarium (Sm).....	104
V- 7- 11- L'Ytterbium (Yb).....	104
V- 7- 12- Résumé de la modélisation par les réseaux de neurones	105
V- 8- Comparaison entre les résultats de modélisation par les trois méthodes.....	106
V- 9- La Prévision de TSP et des ETM associés	107
V- 9- 1- Prévision des TSP	107
V- 9- 2- Détermination des ETM à partir des TSP.....	107
V- 9- 3- Prévision des ETM	108
V- 10- Validation des modèles et des techniques des prévisions.....	110
V- 10- 1- Les TSP.....	110
V- 10- 2- Le Scandium (Sc)	111
V- 10- 3- Le Brome (Br).....	111
V- 10- 4- Le Samarium (Sm).....	112
V- 10- 5- Le Lanthane (La)	112
V- 10- 6- Le Sodium (Na)	113
V- 10- 7- L'Antimoine (Sb).....	113
Conclusion générale	116
Références bibliographiques	119
Annexes.....	123

Liste des tableaux

Tableau I-1: Principales sources d'émission des ETM.....	9
Tableau I-2: Sources de pollution et morbidité.....	10
Tableau I-3: Les cibles affectées par les métaux lourds.....	11
Tableau I-4: Valeurs cibles et valeurs limites des TSP et de quelques ETM.....	11
Tableau I-5: Caractéristique des filtres membranaire.....	13
Tableau I-6: Comparaison entre les méthodes techniques d'analyse des ETM.....	17
Tableau II-1: Différents type d'analyses par activation.....	21
Tableau III-1: Composantes principales extraite des sept individus.....	33
Tableau III-2: Comparaison entre le neurone biologique et le neurone artificiel.....	35
Tableau V-1: Comparaison des TSP à Draria et à Alger centre.....	74
Tableau V-2: Concentrations des ETM associés aux TSP.....	75
Tableau V-3: Comparaison des ETM de la présente zone d'étude avec d'autres villes mondiales.....	84
Tableau V-4: Résumé de la modélisation par lissage exponentiel double.....	92
Tableau V-5: Résumé de la modélisation par le modèle ARMA.....	98
Tableau V-6: Résumé de la modélisation par les réseaux de neurones.....	105
Tableau V-7: Comparaison entre les résultats obtenus par les trois méthodes de modélisation.....	106
Tableau V-8: Réseaux de neurones de la prévision des TSP.....	107
Tableau V-9: Réseaux de neurones de la prévision des ETM à partir des TSP.....	107
Tableau V-10: Prévision des ETM associés aux TSP.....	108

Liste des figures

Figure I-1: Agrandissement des PM10 et PM2.....	7
Figure I-2: Pénétration des PMi dans le système respiratoire.....	8
Figure I-3: Comparaison entre PMi, grain de sable et un cheveu humain.....	8
Figure II-1: Principe de la méthode d'analyse par activation neutronique.....	18
Figure II-2: Schéma d'une chaîne de spectrométrie γ utilisée en analyse par activation neutronique.....	19
Figure III-1: Modélisation des PM _{2,5} en suspension entre 2001 et 2006 par un balayage satellitaire NASA.....	28
Figure III-2: Méthode des moindres carrés.....	29
Figure III-3: Représentation de l'ACP par un nuage de point.....	33
Figure III-4: Neurone formel de Mc Culloch et Pitts.....	34
Figure III-5: Neurone biologique.....	35
Figure III-6: Réseau de neurones artificiels de cinq entrées, une couche cachée et une sortie.....	35
Figure III-7: Opération neuronale fondamentale.....	38
Figure III-8: Fonction Tansig.....	38
Figure III-9: Fonction Logsig.....	38
Figure III-10: Comparaison entre l'apprentissage avec l'algorithme de LM seul et l'algorithme LM+régularisation bayésienne.....	40

Figure III-11: Principe de la rétropropagation.	43
Figure III-12: Exemple lissage exponentiel simple.....	46
Figure III-13: Exemple lissage exponentiel double.	47
Figure IV-1: Schéma illustrant les connexions entre les équipements de prélèvement.	50
Figure IV-2: Schémas illustrant la géométrie du système de prélèvement.	52
Figure IV-3: Simulation de la circulation d'air au niveau de site de prélèvement.....	56
Figure IV-4: Schéma de conditionnement des échantillons dans la capsule destinée à l'irradiation.....	57
Figure IV-5: Schéma de la géométrie (source-détecteur).	58
Figure IV-6: Illustration du résultat fournit par l'ACP.....	62
Figure IV-7: Exemple d'un Corrélogramme.....	64
Figure IV-8: Représentation schématique de l'architecture d'un RN.	65
Figure IV-9: Schématisation de l'architecture de la modélisation par réseau de neurones.	66
Figure IV-10: Principe de calcul d'erreurs sur les modèles.....	67
Figure IV-11: Schéma de la méthode itérative des réseaux de neurones.....	69
Figure IV-12: Schéma du réseau de neurones déterminant les ETM_J à partir des TSP_{J-i}	70
Figure IV-13: Schématisation de la combinaison entre le RN de la prévision des TSP et le RN de détermination des ETM.	71
Figure V-1: Concentrations des TSP au cours du temps.....	74
Figure V-2: Représentation de la concentration de l'Yb et les erreurs relatives des 12 derniers prélèvements.....	76
Figure V-3: Représentation des concentrations du Cérium (Ce).	76
Figure V-4: Représentation des concentrations du Sodium (Na) et du Fer (Fe).....	77
Figure V-5: Représentation des concentrations du Brome (Br) et du Chrome (Cr).	78
Figure V-6: Représentation des concentrations du Samarium (Sm) et du Cadmium (Cd).	79
Figure V-7: Représentation des concentrations du Lanthane (La) et de l'Antimoine (Sb).....	79
Figure V-8: Représentation des concentrations du Gadolinium (Gd) et du Sélénium (Se).	80
Figure V-9: Représentation des concentrations de l'Ytterbium (Yb) et du Hafnium (Hf).	81
Figure V-10: Représentation des concentrations du Scandium (Sc) et du Cobalt (Co).	81
Figure V-11: Représentation des concentrations du Molybdène (Mo) et de l'Arsenic (As).	82
Figure V-12: Représentation des concentrations du Strontium (Sr) et du Zinc (Zn).	83
Figure V-13: Représentation des concentrations de l'Europium (Eu) et du Césium (Cs).	84
Figure V-14: Résultat de la création des séries chronologiques.	86
Figure V-15: LED des TSP.	87
Figure V-16: LED du Samarium (Sm).	87
Figure V-17: LED du Brome(Br).....	88
Figure V-18: LED du Cérium(Ce).	88
Figure V-19: LED du Chrome(Cr).....	89
Figure V-20: LED du Scandium(Sc).....	89
Figure V-21: LED de l'Ytterbium(Yb).	90
Figure V-22: LED du Lanthane(La).....	90
Figure V-23: LED de l'Antimoine (Sb).	91
Figure V-24: LED du Hafnium(Hf).	91
Figure V-25: LED du Sodium(Na).....	92
Figure V-26: Modélisation des TSP par le Modèle ARMA.....	93

Figure V-27: Modélisation du Brome (Br) par le Modèle ARMA.	93
Figure V-28: Modélisation du Cérium (Ce) par le Modèle ARMA.....	94
Figure V-29: Modélisation du Chrome (Cr) par le Modèle ARMA.	94
Figure V-30: Modélisation du Hafnium(Hf) par le Modèle ARMA.....	95
Figure V-31: Modélisation du Lanthane(La) par le Modèle ARMA.	95
Figure V-32: Modélisation du Sodium(Na) par le Modèle ARMA.	96
Figure V-33: Modélisation de l'Antimoine(Sb) par le Modèle ARMA.	96
Figure V-34: Modélisation du Scandium (Sc) par le Modèle ARMA.	97
Figure V-35: Modélisation du Samarium (Sm) par le Modèle ARMA.	97
Figure V-36: Modélisation de l'Ytterbium (Yb) par le Modèle ARMA.	98
Figure V-37: Modélisation des TSP par les réseaux de neurones.....	99
Figure V-38: Modélisation du Brome (Br) par les réseaux de neurones.	100
Figure V-39: Modélisation du Cérium(Ce) par les réseaux de neurones.	100
Figure V-40: Modélisation du Chrome(Cr) par les réseaux de neurones.	101
Figure V-41: Modélisation du Hafnium(Hf) par les réseaux de neurones.	101
Figure V-42: Modélisation du Lanthane(La) par les réseaux de neurones.	102
Figure V-43: Modélisation du Sodium(Na) par les réseaux de neurones.	102
Figure V-44: Modélisation de l'Antimoine(Sb) par les réseaux de neurones.	103
Figure V-45: Modélisation du Scandium(Sc) par les réseaux de neurones.	103
Figure V-46: Modélisation du Samarium(Sm) par les réseaux de neurones.....	104
Figure V-47: Modélisation de l'Ytterbium(Yb) par les réseaux de neurones.	104
Figure V-48: Résumé de la modélisation par les réseaux de neurones, (A) phase d'apprentissage, (B) la modélisation.	105
Figure V-49: Comparaison entre les trois méthodes de modélisation. (A) le coefficient de détermination, (B) le VCDME.	106
Figure V-50: Résultats de la prévision des ETM aux jours $J+i$ à partir des TSP.....	109
Figure V-51: Prévision des TSP.....	110
Figure V-52: Prévision du Scandium (Sc).	111
Figure V-53: Prévision du Brome (Br).	111
Figure V-54: Prévision du Samarium (Sm).....	112
Figure V-55: Prévision du Lanthane (La).	112
Figure V-56: Prévision du Sodium (Na).	113
Figure V-57: Prévision de l'Antimoine (Sb).	113

Introduction générale

Introduction générale

La notion de la pollution atmosphérique est relativement très ancienne, des mythes de la Chine ancienne, comme Lao Tseu, s'inquièrent des impacts de l'activité humaine sur l'environnement (notamment l'air). La notion de la pollution atmosphérique a connu de profondes mutations, elle évolue et change d'échelle ; elle intègre des phénomènes complexes et interdépendants allant de l'échelle globale à l'échelle locale, du changement climatique planétaire aux modifications dans la biodiversité. Les enjeux de la pollution atmosphérique sont devenus au plus haut niveau, les chercheurs et la société civile en font une de leurs principales préoccupations, les conventions internationales de réduction de la pollution représentent une réglementation de plus en plus sévère et restrictive et sont le résultat de ces préoccupations.

En milieu urbain, le trafic routier constitue l'une des principales sources émettrices de particules fines (aérosols) dans l'atmosphère, cette pollution atmosphérique se caractérise par des émissions primaires qui sont soit d'origine naturelle ou artificielle.

A Alger, le parc automobile connaît une très forte croissance, et ce de part les facilités d'achat mises en place dans l'acquisition d'un véhicule et l'amélioration des conditions socio-économiques de la population; il en résulte que malgré toutes les mesures prises, l'évolution industrielle, la consommation croissante des ressources énergétiques naturelles et la pollution automobile ont fait que dégrader la qualité de l'air qui deviendra de plus en plus préoccupante.

Les particules en suspension dans l'atmosphère sont des complexes solides et/ou liquides composées de substances minérales et organiques. Ces particules fines véhiculent principalement des imbrûlés et noyaux carbonés, des particules issues de la conversion gaz/particules, des éléments minéraux et divers métaux lourds toxiques tels que le Pb, Sm, Ce, Cr,... qui jouent sans doute un rôle important dans la toxicité de l'aérosol.

Toutes ces indications font que de nos jours, l'étude des particules véhiculées par les aérosols atmosphériques constitue un axe important dans l'évaluation globale de la pollution de l'air, des études très minutieuses ont corrélé la toxicité des particules fines à leurs tailles et à leurs compositions en métaux, d'autres études épidémiologiques ont pu constater la parfaite relation de l'exposition à la pollution par les particules fines à l'apparition de diverses maladies respiratoires.

Les impacts négatifs de la pollution atmosphérique sur la santé humaine, la faune et la flore nous ont amené à envisager une modélisation non conventionnelle préventive en faisant appel à une technique qui ne nécessite pas la connaissance explicite des lois physiques liées aux phénomènes à expliquer mais qui nécessite des données numériques. L'intelligence artificielle par les réseaux de neurones, utilisés avec succès dans la modélisation des séries chronologiques, offrent l'avantage d'être un outil non linéaire, multi-variable, paramétrable par apprentissage sur des données expérimentales représentatives, et dans lequel il est possible d'inclure tout ou une partie de la connaissance physique disponible.

Ainsi l'objectif des modèles élaborés sera de prédire l'évolution au cours du temps des concentrations des TSP et des Eléments Traces Métalliques associés présent dans l'air. Pour cela, il faut nécessairement envisager l'utilisation d'un modèle récurrent ou bouclé dont le retard sera équivalent à une période d'échantillonnage.

Devant cette situation et afin d'évaluer la qualité de l'air au niveau de Sebbala qui se situe à la banlieue de la commune de Draria, wilaya d'Alger. Nous nous sommes intéressés en première étape à l'étude qualitative et quantitative de la pollution atmosphérique en Totales Particules en Suspensions (TSP) et en Eléments Traces Métalliques associés (ETM) dans ce site. L'Analyse par Activation Neutronique Instrumentale (AANI) est la méthode la plus performante dans ce genre d'étude vu qu'elle est dotée d'une haute précision, multi-élémentaire, non destructive et simple à mettre en oeuvre.

En deuxième étape nous avons modélisé la pollution atmosphérique en TSP et en ETM associés présent dans notre site d'étude, sans utiliser aucun logiciel et aucun modèle existant qui décrivent la pollution atmosphérique (modèle Gaussien de la dispersion des polluants dans l'atmosphère), afin de créer des modèles exploitables qui aideront à la prise de décisions rapides. Nous avons donc développé un modèle complexe qui associe autant de réseaux que d'éléments, chacun ayant été élaboré pour estimer un élément particulier.

Par cette étude nous visons les objectifs :

- Estimation et quantification de la pollution atmosphérique par les TSP et les ETM associés sans les analyser.
- Gagner le temps opératoire (échantillonnage et analyse).
- Minimiser les coûts d'analyses.
- Création des scénarios prévisionnistes.
- réfléchir aux mesures à prendre et à la formulation d'une stratégie de prévention de la pollution.

Chapitre I

La pollution atmosphérique

« J'ai connu un temps où la principale pollution venait de ce que les gens
secouaient de leurs tapis par la fenêtre »

(Gilbert Cesbron 1913-1979)



Introduction

La notion de la pollution atmosphérique est relativement ancienne. Des auteurs, comme Lao Tseu¹, s'inquiétaient des impacts de l'activité humaine sur l'environnement (notamment l'air) [1].

La pollution de l'air engendre un très grand nombre de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives, cependant, l'établissement des règlements contre ce problème était nécessaire. En 1648, le texte de John Evelyn², présente le premier grand texte spécifiquement consacré à la pollution atmosphérique, ce texte illustre bien les débuts de la « pré-révolution » industrielle avec une utilisation croissante du charbon comme combustible pour l'industrie et le chauffage, et les impacts environnementaux qui en résultent [1].

Diverses disciplines techniques et scientifiques sont concernées par les problèmes de pollution atmosphérique, la montée en puissance de la physique et de la chimie permet une compréhension de plus en plus fine des processus, tandis que l'augmentation des émissions (liées à l'industrialisation croissante et aux débuts de l'automobile) fait émerger peu à peu des préoccupations environnementales.

¹ Mythique de la Chine ancienne et fondateur du taoïsme.

² Ecrivain, paysagiste et mémorialiste anglais.

Chapitre I : La pollution atmosphérique

I- 1- Composition de l'air

L'homme inhale quotidiennement environ 15 000 litres d'air qui est composé majoritairement d'azote (78%) et d'oxygène (21%) accompagné d'un peu d'argon (0.9%) et de dioxyde de Carbone (0.035%), le reste est constitué de gaz rares (Hélium, Krypton, Xénon) et d'hydrogène. L'air typique de l'environnement terrestre est souvent humide car il contient de la vapeur d'eau. Il peut aussi contenir du dioxyde de soufre, des oxydes d'azote, de fines substances en suspension sous forme d'aérosol, des poussières et des micro-organismes [2].

I- 2- La pollution de l'air

La pollution atmosphérique est définie comme étant la modification de la composition chimique de l'air, sous l'effet des activités humaines directes ou indirectes. Elle peut se manifester depuis l'échelle urbaine et locale jusqu'à l'échelle planétaire et les risques liés à ces changements ne sont pas de même nature selon l'échelle spatio-temporelle concernée.

On compte aujourd'hui des dizaines de milliers de molécules différentes, polluants avérés ou suspectés qui, pour beaucoup, agissent en synergie³ entre eux et avec d'autres paramètres (ultraviolets solaire, hygrométrie, acides,...), cette pollution peut revêtir de multiples formes :

- Brève ou chronique.
- Visible (fumée) ou invisible (pesticides dans l'air).
- Emise massivement pollution émise par les centaines de millions de pots d'échappement) ou en faible dose.
- Emise en quantité dispersée.
- Locale et émise par une source fixe (cheminée, usine...), ou émise par des sources mobiles (voitures, épandeurs de pesticides, transport maritime ou aérien).

I- 2- 1- Origine de la pollution de l'air

La pollution de l'air est la résultante de multiples facteurs : croissance de la consommation d'énergie, développement des industries extractives, industrie métallurgiques et chimiques, circulation routière et aérienne, l'incinération,... Ainsi, la production, l'utilisation d'énergie et l'étalement des grandes agglomérations a pour corollaire des besoins en transports toujours plus nombreux, en sont les principaux moteurs.

Mentionnons également les feux de végétation tropicale issus de la culture sur brûlis⁴ pratiquée dans les pays peu riches, une pollution atmosphérique visible sur l'imagerie satellitaire, qui dégagent de la suie, du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, des hydrocarbures, du monoxyde d'azote et du dioxyde d'azote. Cette pollution reste encore une des plus importantes origines de la pollution de l'air.

³ Un phénomène par lequel plusieurs acteurs, facteurs ou influences agissant ensemble créent un effet plus grand que la somme des effets attendus s'ils avaient opéré indépendamment.

⁴ Système agricole dans lequel les champs sont défrichés par le feu qui permet un transfert de fertilité.

I- 2- 2- Principaux polluants : sources et effets

Les polluants atmosphériques sont ordonnés dans deux classes [3]:

- Polluants primaires : Des polluants directement émis par les activités humaines (NO_x , CO , CO_2 , SO_2 , COV , HAP , CFC , HFC ,...).
- Polluants secondaires : cette classe des polluants est produite par la réaction chimique ou photochimique d'un ou plusieurs polluants primaires (O_3).

I- 2- 2- 1- Oxydes d'azotes (NO_x)

Proviennent essentiellement de la combustion des combustibles fossiles. L'azote N et l'oxygène O entrent en réaction dans les conditions de hautes températures et de pression des moteurs pour former du monoxyde d'azote (NO) qui se transforme, en présence d'oxygène, en NO_2 (de 0,5 à 10 %) dans le foyer. Les NO_x mesurés à la sortie du pot d'échappement sont composés, principalement de NO et de NO_2 , avec une proportion de 60 à 80% de NO . L'oxydation de NO en NO_2 se poursuit dans l'atmosphère et explique dans le cas des villes à forte circulation la couleur brunâtre des couches d'air pollué situées à quelques centaines de mètres d'altitude. Les NO_x sont à l'origine de l'irritation, les affections respiratoires et l'asthme [25].

I- 2- 2- 2- Monoxyde de carbone (CO)

C'est un gaz incolore, inodore et insipide, produit par des combustions incomplètes des matières organiques généralement dues à des installations mal réglées (surtout le cas des toutes petites installations), sa diffusivité est très rapide dès son éloignement de la source d'émission. Le CO est un puissant toxique qui empêche la fixation de l'oxygène sur les globules rouges (anoxie) et il devient mortel à forte dose (à partir de 20 ppm) [3].

I- 2- 2- 3- Dioxyde de carbone (CO_2)

L'importance attribuée au CO_2 provient de l'accroissement rapide de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère par suite d'une augmentation de la consommation d'énergie fossile et d'une diminution importante des couverts forestiers (une forêt de type tropical absorbe de 1 à 2 kg de $CO_2/m^2/$), le dioxyde de carbone rejeté par les moyens de transport a augmenté de manière spectaculaire ces dernières décennies.

I- 2- 2- 4- Dioxyde de soufre (SO_2)

C'est un gaz émis naturellement lors des éruptions volcaniques, et artificiellement lors de la combustion des matières fossiles soufrés (charbon, fuel, gazole,...). Le dioxyde de soufre se présente en tant que le principal responsable des pluies acides, ces dernières ont un effet nocif sur les végétaux et sur l'acidification des eaux continentales, la dégradation des matériaux (bâtiments et du patrimoine historique). Le SO_2 provoque l'irritation, l'affection respiratoire et des accidents cardio-vasculaires lors des fortes expositions [3].

I- 2- 2- 5- Composés organique volatiles (COV)

Regroupent une multitude de substances et ne correspondent pas à une définition très rigoureuse, parmi ces substances, les hydrocarbures et les composés carboxylés (aldéhydes, cétones, éthers...).

Les COV sont émis par évaporation à la pompe, au niveau du carburateur et du réservoir, par perte (éclaboussures à la pompe ou au niveau du réservoir) et dans les gaz d'échappement. Les COV provoquent une gêne olfactive, risques cancérigènes, tératogènes et mutagènes pour certaines substances, irritations diverses et diminution de la capacité respiratoire [3].

I- 2- 2- 6- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP, dont certains sont reconnus dangereux pour la santé car cancérigènes, la majorité des HAP proviennent des processus de pyrolyse et en particulier de la combustion incomplète de matière organique ou de composés carbonés [3].

I- 2- 2- 7- Chlorofluorocarbure (CFC)

Les CFC, ou *fréon* dans le langage courant, sont totalement artificiels (à l'exception du chlorure de méthyle d'origine marine). Ce sont des agents destructeurs de l'ozone stratosphérique [3].

I- 2- 2- 8- Hydrofluorocarbures (HFC)

Synthétisés exclusivement par voie chimique les HFC n'avaient pas d'applications importantes avant l'adoption du protocole de Montréal (interdiction des CFC) et des HCFC qui leur ont succédé. Ces composés qui participent également à l'effet de serre sont aujourd'hui utilisés comme agent de propulsion des aérosols, comme fluides réfrigérants, solvants, agents d'expansion des mousses [3].

I- 2- 2- 9- Ozone troposphérique (O₃)

Polluant secondaire, résultant de réactions entre polluants primaires (COV et NO_x) sous l'effet de rayonnements solaires [3].

I- 2- 2- 10- Les particules

On entend par particules ou *aérosols* (Figure I-1), les particules liquides ou solides en suspension dans l'air. On distingue, comme pour les espèces gazeuses, les aérosols *primaires* (directement émis) et des aérosols *secondaires*. Les émissions d'aérosols sont anthropiques (par exemple liées aux résidus de combustion, suies) ou biogéniques (sels de mer, aérosols minéraux - sable - mis en suspension sous l'action du vent, débris végétaux). La formation des aérosols secondaires dans l'atmosphère résulte principalement de la condensation de gaz semi-volatils sur des particules persistantes [1].

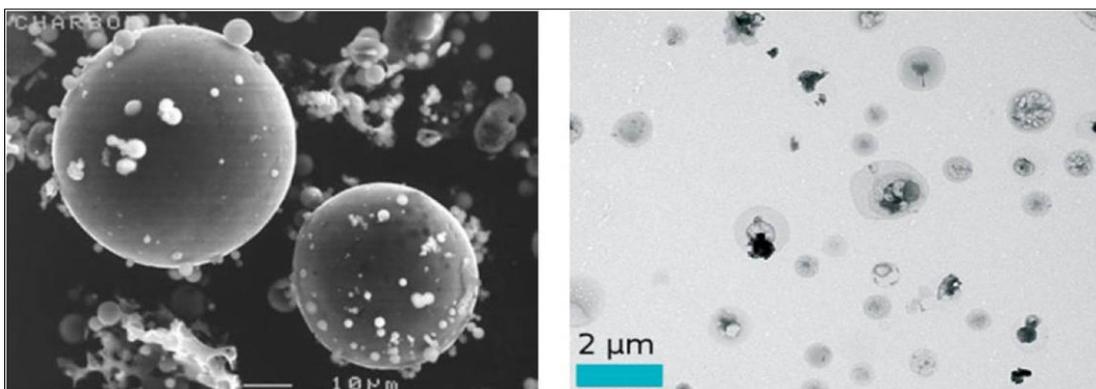


Figure I-1: Agrandissement des PM₁₀ et PM₂ [23].

La taille des aérosols atmosphériques varie de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres, on désigne par PM_x les aérosols dont le diamètre *aérodynamique* est inférieur ou égal

à $x \mu\text{m}$. Le diamètre aérodynamique est, par définition, le diamètre d'une sphère de masse volumique 1g/cm^3 , qui aurait une vitesse de chute égale à celle de la particule, on distingue habituellement $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} , pour lesquels la réglementation s'applique contrairement aux aérosols issus des fumés noir qui ont un diamètre compris entre $0,1$ à $5 \mu\text{m}$.

Selon leurs tailles (Figure I-2), ces particules fines pénètrent plus ou moins profondément dans le système respiratoire.

- Des particules de type $\text{PM}_{2,5}$ par exemple arrivent jusqu'au niveau des alvéoles pulmonaires.
- Les particules issues des processus de combustion sont identifiées comme étant particulièrement dangereuses.

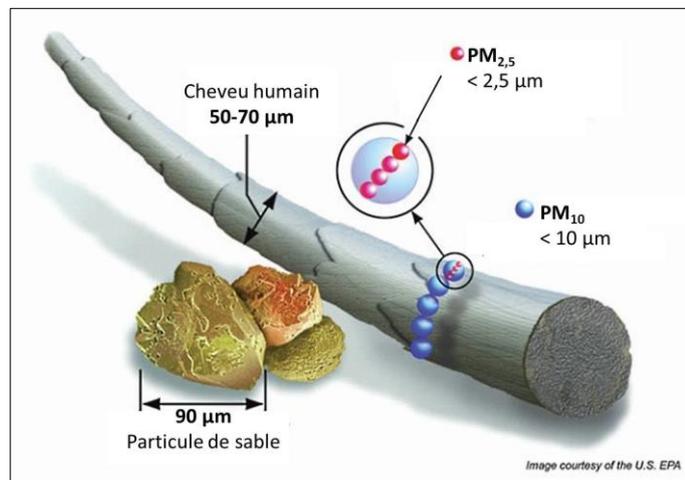


Figure I-2: Pénétration des PM_i dans le système respiratoire [5].

La Figure I-3 illustre la profondeur que les PM_i peuvent atteindre dans le système respiratoire

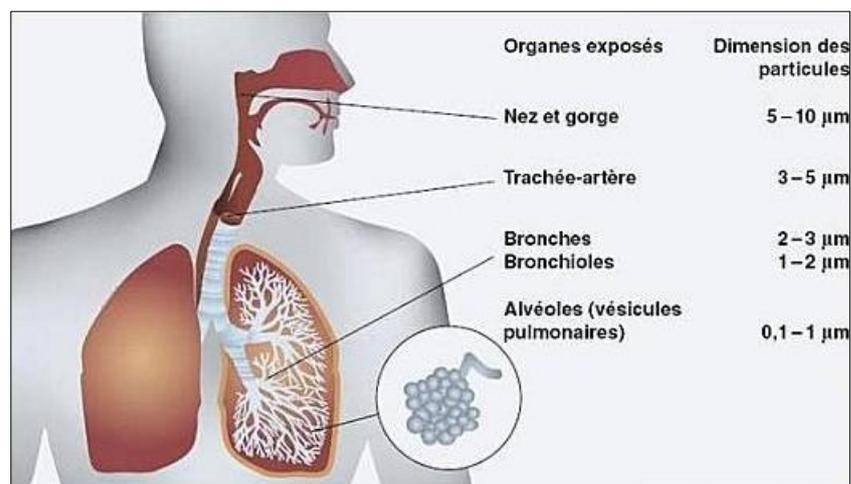


Figure I-3: Comparaison entre PM_i , grain de sable et un cheveu humain [4].

I- 2- 2- 11- Les Eléments Traces Métalliques

Les éléments traces métalliques (ETM), anciennement appelés métaux lourds, Leur notion est un concept factuel, industriel, avant tout empirique, sans définition scientifique précise, ni technique unanimement reconnue.

À titre d'exemple, un rapport d'information au Sénat français « Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé », indiquait : « L'appellation métaux lourds est cependant une appellation courante qui n'a ni fondement scientifique ni application juridique ».

Certains auteurs définissent les ETM comme les éléments métalliques ayant une masse volumique supérieure à une certaine valeur (cette valeur minimale variant entre 4000 kg/m³ et 5000 kg/m³ selon les auteurs).

D'autres définissent comme ETM les éléments métalliques compris entre le cuivre et le plomb dans le tableau périodique des éléments (excluant donc le fer, le chrome).

Pour d'autres il s'agit de tous les éléments métalliques à partir de la quatrième période du tableau périodique des éléments. Comme étant les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer, issues de certaines activités humaines (la combustion des fossiles, l'incinération des déchets et certains procédés), ils sont souvent liés aux particules fines PM_{2,5} à l'exception du mercure qui est principalement gazeux. Comme leur nom l'indique, ces métaux lourds existent naturellement mais en quantités très faibles dans les sols, l'eau et l'air, chaque métal possède des caractéristiques et un impact propre à lui [2].

Le quart de la contamination par les métaux est dû aux ordures ménagères. Les principales autres sources d'émission sont résumées dans le tableau I-1 :

Tableau I-1: Principales sources d'émission des ETM [6].

Source industrielle	Métaux lourds émis
Combustibles minéraux solides	Arsenic (As), Cadmium (Cd), Cuivre (Cu)
Combustion fioul lourd	Arsenic (As), Cadmium (Cd), Cuivre (Cu), Nickel (Ni), Sélénium (Se), Zinc (Zn)
Combustion du charbon	Mercure (Hg), Zinc (Zn)
Combustion du pétrole	Mercure (Hg)
Combustion biomasse	Zinc (Zn)
Incinération de déchets	Arsenic (As), Sélénium (Se), Chrome (Cr)
Production de verre	Plomb (Pb)
Fabrication de certains verres	Arsenic (As), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Zinc (Zn)
Métallurgie des ferreux	Arsenic (As), Cuivre (Cu), Zinc (Zn)
Fonderie	Chrome (Cr)
Production de zinc	Cadmium (Cd)
Industrie du chlore	Mercure (Hg)
Production de ciment	Chrome (Cr)
Production des batteries	Plomb (Pb)

La présence des métaux lourds dans l'environnement est connue depuis bien des années. La forte concentration de ces derniers présente un risque majeur pour la santé humaine et pour l'environnement par leurs propriétés [52]:

- Ils ne sont pas dégradables.
- Ils sont enrichis au cours de processus minéraux et biologiques, puis s'accumulent dans la nature.
- Ils peuvent être absorbés directement par le biais de la chaîne alimentaire, entraînant des effets aigus ou chroniques.

I- 2- 2- 11- 1- Impact sur la végétation

«Les trop fortes teneurs en métaux lourds diminuent la densité, la biodiversité et l'activité de la microflore et de la microfaune du sol.»[53].

Une forte concentration des métaux lourds entraîne un déséquilibre métabolique. En effet, l'accumulation des métaux lourds dans l'organisme des végétaux se traduit par le remplacement des éléments essentiels par leur pouvoir oxydant et leur forte stabilité. Ceci conduit non seulement à la nécrose des racines et par la suite la mort des végétaux mais aussi le transfert de ces métaux dans la chaîne alimentaire [54].

I- 2- 2- 11- 2- Impact sur les animaux

«Les animaux peuvent être contaminés par contact avec la peau, par inhalation de poussières toxiques et par ingestion de l'eau et d'aliments pollués. La dispersion des métaux constitue un danger pour la faune sauvage, le bétail et l'Homme, qui se situe en bout de chaîne alimentaire. Dans certaines zones très contaminées, le pâturage, les cultures fourragères ou destinées à l'alimentation humaine sont interdites.»[53].

I- 2- 2- 11- 3- Impact sur la santé

Les métaux lourds dans l'atmosphère sont sous forme de particules en suspensions à l'exception de certains métaux qui sont volatils à température ambiante (le mercure par exemple), Par conséquent, l'homme est touché par cette pollution via les voies respiratoires qui se traduit par l'apparition de nombreuses maladies et morbidités [55].

Tableau I-2: Sources de pollution et morbidité.

Type	Sources	Morbidité
Aérienne	Fumée domestique, auto-moto, carburants, industrie.	Malaise respiratoires, cancers, réchauffement général.
Hydrique	Eau- aliments	Diarrhée, mal à vecteurs
Sols	Déchets domestiques, déchets urbains, industrie	Dengue, cancers, malformations, retard mental (métaux lourds)

Tableau I-3: Les cibles affectées par les métaux lourds.

Cible	Arsenic	Cadmium	Cuivre	Mercure	Plomb	Thallium
Mutations génétiques	-	-	-	X	-	-
Système immunitaire	-	X	-	-	-	-
Système nerveux	X	-	-	X	X	X
Lésions cérébrales	-	-	X	X	X	-
Peau	X	-	-	-	-	X
Poumons système respiratoire	X	X	-	-	-	X
Système digestif et gastro-intestinal	X	-	-	X	-	-
Foie	-	-	-	X	-	-
Reins	X	X	-	X	X	-
Sang	-	-	-	-	X	-
Cancer	X	X	-	-	-	-

I- 3- Normes et réglementation

Vu les nombreuses risques provoqués par les ETM et les particules en suspension (TSP) sur à la santé humaine, la faune et la flore, plusieurs conventions internationales portent sur la pollution atmosphérique.

Selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) et le journal officiel de l'Union européenne, la réglementation actuelle ne touche que certain métaux lourds.

Tableau I-4: Valeurs cibles et valeurs limites des TSP et de quelques ETM [6].

Polluant	Union Européenne		OMS
	Valeur limite	Valeur cible ⁵	Valeur limite
Plomb (Pb)	0,5 µg/m ³ ⁶	-	0,5 µg/ m ³
Arsenic (As)	-	6 ng/ m ³	-
Cadmium (Cd)	-	5 ng/ m ³	5 ng/ m ³
Nickel (Ni)	-	20 ng/ m ³	20 ng/ m ³
Mercure (Hg)	50 ng/ m ³	-	-
TSP	20 ng/ m ³	30 ng/ m ³	10 ng/ m ³

Le journal officiel de la République Algérienne du 08 Dhou El Hidja 1426 / 8 janvier 2006 consacre les articles 03,04, 05, 06, 07, 08 et 09 pour la surveillance de la qualité de l'air. L'extrait de ces articles est le suivant :

- La surveillance de la qualité de l'air concerne CO₂, SO₂, O₃, TSP
- Les valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l'air sont fixés comme suit :
 - * Objectif de qualité ou valeur cible (TSP) : **50 µg/m³**.
 - * Valeur limite des TSP: **80 µg/m³**.

⁵ Moyenne calculée sur l'année civile du contenu total de la fraction PM₁₀.

⁶ La procédure de réexamen de la présente directive prévue à l'article 10 envisagera la possibilité de compléter ou de remplacer la valeur limite par une valeur limite de dépôt à proximité immédiate des sources ponctuelles.

- Lorsque les seuils d'information et les seuils d'alerte sont atteints ou risquent de l'être, les responsables prennent toutes les mesures visant à protéger la santé humaine et l'environnement ainsi que les mesures de réduction et/ou de restriction des activités polluantes.

I- 4- Méthode d'échantillonnage

L'échantillonnage des aérosols est l'opération qui permet d'obtenir un échantillon de matière dispersée dans l'air sous forme de particules solides ou liquides. Cette opération peut répondre à plusieurs objectifs :

- Déterminer les caractéristiques physico-chimiques de l'aérosol en un point.
- Mesurer l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres au cours du temps.
- Évaluer l'exposition de personnes à des substances nocives ou toxiques à un poste de travail particulier.

Un système d'échantillonnage d'aérosol comprend généralement plusieurs parties distinctes ayant chacune leur fonctionnalité. L'aérosol est aspiré à travers un orifice ou une fente à l'aide d'une pompe d'aspiration menée d'un volumètre ou d'un débitmètre, qui assure le captage de l'aérosol ambiant.

L'aérosol aspiré est piégé dans un filtre placé au niveau de l'orifice d'aspiration (généralement l'aérosol échantillonné correspond aux particules collectées sur ce support de collecte). Si les particules contiennent des substances volatiles, celles-ci peuvent subir une vaporisation partielle sur le support. Pour mesurer de telles substances, il convient d'utiliser soit dans la cassette (support du filtre), soit à l'intérieur d'un dispositif extérieur associé, un ou plusieurs substrats capables de fixer la phase vapeur (filtre imprégné de réactif, support adsorbant,...).

Les particules de l'aérosol subissent tout au long de leur cheminement, depuis l'air ambiant jusqu'au filtre, une série d'événements qui influent sur leur probabilité d'être échantillonnées effectivement sur le support final. Le mouvement des particules de l'aérosol au voisinage et à l'intérieur d'un échantillonneur est uniquement guidé par des paramètres physiques liés aux particules (taille, forme, densité,...), à la géométrie de l'échantillonneur et aux conditions aérodynamiques de son environnement immédiat (vitesse d'air extérieur, intensité de turbulence,...).

I- 4 -1- Le choix du site de prélèvement

Le choix d'un site d'étude ou de prélèvement est en fonction du type de pollution atmosphérique à surveiller et du risque présentés sur ce site. Quand il s'agit de la santé humaine, l'installation de stations de surveillance de la qualité de l'air au niveau des centres urbains à densité importante est plus que nécessaire.

I- 4 -2- Le choix du filtre

Le choix des filtres pour la collecte des TSP doit répondre aux trois exigences suivantes [11] :

- Une efficacité de collection d'au moins 99% pour les particules de diamètre égal ou supérieur à 0,3µm ($d = 0,3\mu\text{m}$).
- Une hygroscopicité faible.
- Un taux d'impureté aussi faible que possible en éléments métalliques pour éviter les interférences lors de l'analyse quantitative des particules collectées sur le filtre.

I- 4 -2- 1- Filtre en fibre de verre

Avec une porosité de 0,1 ÷ 4µm, ces filtres présentent une efficacité de rétention de 99,9% pour les PM₁₀ > 0,3µm, mais ils ne sont pas fiables pour l'analyse qualitative des particules retenues vu que plusieurs éléments métalliques rentrent dans leur composition [11].

I- 4 -2- 2- Filtres membranaires

Ce sont des filtres nitrocellulose, acétate et ester de cellulose qui sont solubles dans les éthers et les alcools caractérisés par leur très grande efficacité. Ils ne sont pas utilisés pour les prélèvements à haut débit car ils présentent une grande résistance à l'écoulement à cause de leur fine porosité.

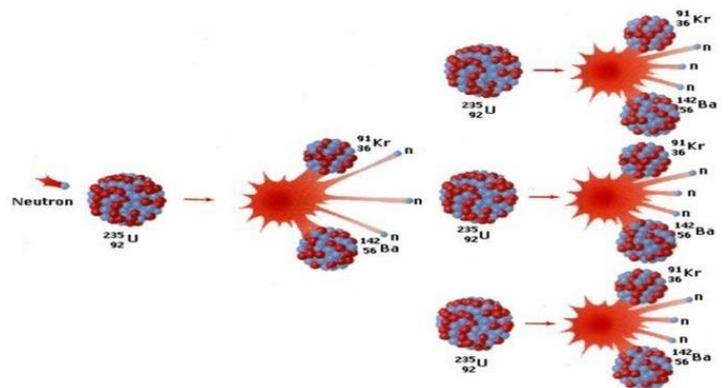
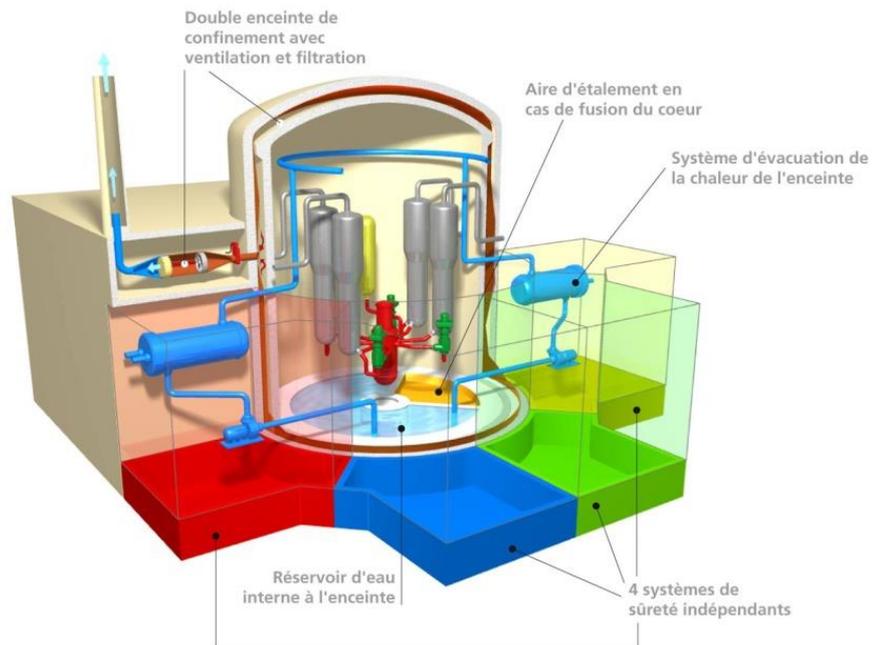
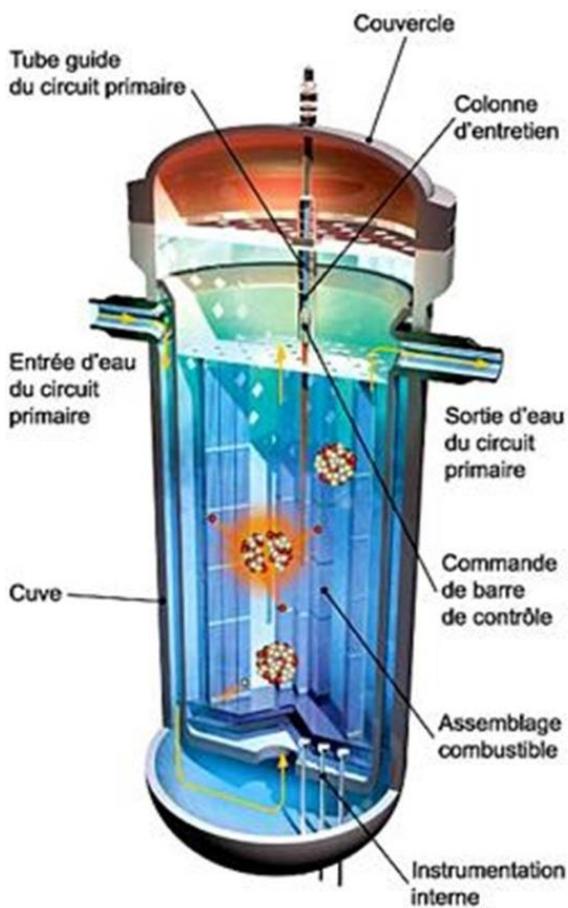
Les propriétés et les caractéristiques de ces filtres sont résumées dans le tableau I-5 :

Tableau I-5: Caractéristique des filtres membranaires [12].

Filtre	Type	Matériel	Epaisseur (mm)	Porosité (µm)	Résistance (mm)	Efficacité (%)
Whatman4	Fibre	Cellulose	0,19	3 à 20	0,35	72
Microsorbant	Fibre	Polystyrène	1,50	0,70	0,04	99,50
MSA1106B	Fibre	Verre	0,23	0,1 à 4	0,10	99,93
Millopore AA	Membrane	Ester cellulose	0,15	0,8	0,19	99,98

Chapitre II

Analyse des ETM : Technique d'Analyse par Activation Neutronique



Introduction

L'analyse chimique par activation neutronique, symbolisée NAA (Neutron Activation Analysis) est une méthode analytique multi-élémentaire, très sensible (Détection des traces de 10^{-12} g), datée des années 50, particulièrement bien adaptée pour analyser la pureté d'un échantillon. La masse de l'échantillon peut varier dans une large mesure, de quelques milligrammes à plusieurs grammes, cette méthode d'analyse ne requiert pas de solubilisation ni de préparation particulière, et peut de ce fait être appliquée même à un objet dont l'intégrité doit absolument être préservée, comme une œuvre d'art.

C'est une méthode d'excellence dans la recherche de traces et d'ultra-traces. Elle s'applique à de très nombreux matériaux (métaux, semi-conducteurs, échantillons archéologiques, biologiques, géologiques,...) et également dans l'environnement (dosage des poussières atmosphériques...) et en criminologie (détection de l'Arsenic...).

Sa mise en œuvre consiste à irradier l'échantillon à analyser par un flux de neutrons et à identifier, après l'irradiation, les isotopes radioactifs créés à partir des éléments à doser.

Chapitre II : Analyse des ETM : Technique d'Analyse par Activation Neutronique

II- 1- Méthodes d'analyse des ETM

La plupart des techniques analytiques utilisées aujourd'hui en analyse de traces peuvent se regrouper en six catégories [13].

- **Technique de spectrométrie atomique optique** qui repose sur l'absorption ou l'émission par les atomes de radiations dues à des transitions électroniques bien définies. Cette classe regroupe aussi bien les techniques d'absorption atomique (utilisant une flamme ou un four) que celles d'émission atomique parmi lesquelles : l'ICP/AES (émission à plasma induit par haute fréquence) qui reste une des techniques majeures en analyse de traces.
- **Méthode électrochimique**, basée sur les phénomènes d'oxydoréduction se produisant à l'électrode.
- **Méthodes de fluorescence X** où les rayons X provoquent l'ionisation des couches profondes de l'atome qui retourne ensuite à son état fondamental après une réorganisation de ses électrons accompagnée de l'émission radiative de photons de longueur d'onde caractéristique.
- **Spectrométries de masse** dont le principe consiste à séparer dans des champs magnétiques forts les ions ou fragments moléculaires gazeux générés par action d'un fort potentiel ou de courants d'électrons ou d'ions. Des techniques telles que la dilution isotopique ou l'ICP/MS (spectrométrie de masse utilisant un plasma comme source d'ions) connaissent à l'heure actuelle une très forte popularité.
- **Spectrophotométrie** basée sur les transferts d'électrons dans les molécules. Ces méthodes sont souvent peu sélectives et nécessitent préalablement une séparation, par chromatographie en général.
- **Techniques d'analyse par activation (AAN)** où elle s'agit de mesurer le nombre de particules émises (α , β , γ) lors de la désexcitation des noyaux atomiques, préalablement excités par irradiation avec des particules telles que les neutrons, les protons, les noyaux d'hélium ou des photons de haute énergie.

Le choix d'une technique d'analyse est conditionné par de nombreux critères. Il faut, en effet, prendre en considération [13] :

- Le ou les éléments à doser.
- L'état physique de l'échantillon ainsi que sa quantité.
- La sélectivité et le degré de précision et de justesse requis pour l'analyse.
- Sans oublier bien sûr les critères économiques que nous mentionnerons.

Tableau I-6: Comparaison entre les méthodes techniques d'analyse des ETM [13].

	ICP/AES	SAA	EDXRF	ICP/MS	NAA	DPACSV
Nature de l'échantillon	liquide	Liquide	Liquide/solide	Liquide	Liquide/Solide	liquide
Volume d'échantillon	+ ⁷	+	+	+	+	-
Sélectivité	Ml.élmnt.	Mn.élmnt.	Ml.élmnt.	Ml.élmnt.	Ml.élmnt.	Mn.élmnt.
Limites de détection	++	+	+	+++	+++	+++

II- 2- L'analyse par activation neutronique

II- 2- 1- Les réaction nucléaires

Les réactions nucléaires sont des processus où les constituants de la matière (noyaux, nucléons...etc.) Interagissent selon une réaction nucléaire forte ou faible. De grandes quantités d'énergies sont émises lors de ces réactions, beaucoup plus que celles émises par des réactions chimiques normales.

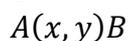
L'énergie minimale pour provoquer une réaction nucléaire est connue comme énergie de seuil. Pour des réactions exothermiques avec des neutrons, le seuil est de zéro.

La radioactivité résulte de désintégrations spontanées de noyaux atomiques instables. Ces noyaux sont dits radioactifs. Cette désintégration radioactive s'accompagne de l'émission de particules α , β^+ ou β^- ou désexcitation (γ).

La réaction (n, γ) , par exemple, est une réaction qui se produit fréquemment avec des neutrons lents, dits neutrons thermiques, dans un réacteur nucléaire comme dans le cas de l'analyse par activation neutronique gamma prompte(PGNAA). Cependant, dans le cas de l'analyse par activation neutronique(AAN), la capture de neutrons produit une série de réactions retardées qui résulte en l'émission de rayons (γ), identifiés par spectroscopie gamma.

De façon générale, le noyau formé de la réaction (n, γ) est instable, se désintégrant par la suite, selon une ou plusieurs étapes, pour former un noyau stable. En traitant les réactions nucléaires, il est communément convenu que les émissions (γ) sont le résultat de la réaction (n, γ) , mais ce n'est pas vrai. En effet, la réaction (n, γ) est utilisée pour la production de radio-isotope où les émissions (γ) sont le produit de la désintégration β^+ ou β^- durant les transitions pour former un noyau stable (Figure II-1)

Une réaction nucléaire peut s'écrire sous une forme d'une réaction chimique normale, mais le plus souvent elle est écrite sous la forme [14] :



A : isotope stable de l'atome cible de l'élément à doser.

B : radio-isotope produit par irradiation.

X : particule incidente.

Y : rayonnement émis pendant ou après l'irradiation.

⁷ + faible

++ très faible

+++extrêmement faible.

En effet, une désintégration radioactive s'accompagne souvent d'un rayonnement électromagnétique de fréquence élevée : un noyau père X, instable, se désintègre en un noyau fils excité Y* qui retourne à son état fondamental Y par des émissions (γ). On parle de désexcitation (γ) :

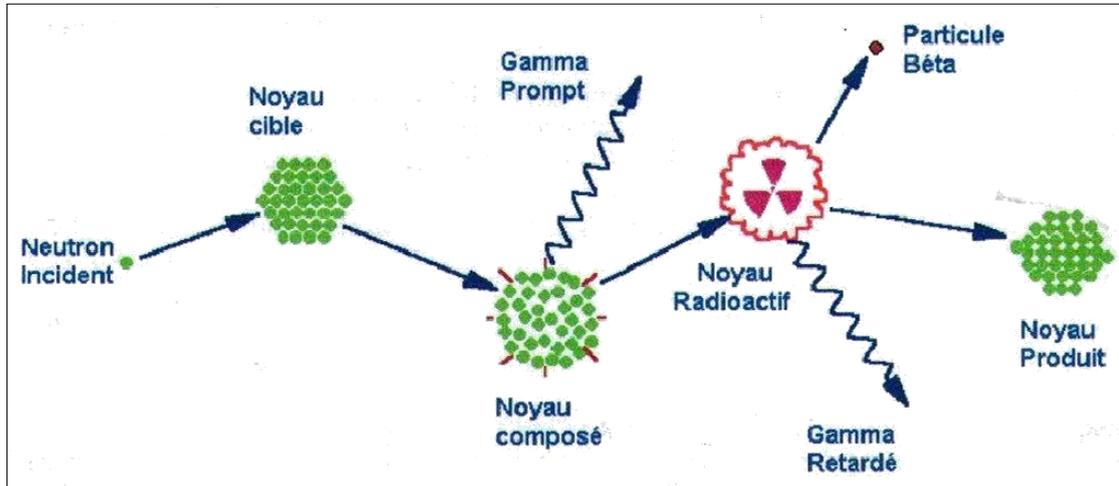
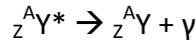


Figure II-1: Principe de la méthode d'analyse par activation neutronique [14].

Une analyse typique effectuée au moyen de cette technique se compose de trois phases distinctes : activation, isolement et quantification.

II- 2 -2- Activation (irradiation)

La première phase consiste en un bombardement de neutron de l'isotope stable dans l'échantillon. Les neutrons interagissent sur le noyau père, formant un nouveau noyau dans un état excité par l'adhésion d'un neutron. Ainsi, le noyau formé, noyau fils, libère l'énergie en excès, conduisant à la formation d'une série de radio-isotopes jusqu'à la formation du noyau final à l'état stable

II- 2 -3- Isolement

La seconde phase du processus consiste en la dose d'énergie de chaque radio-isotope qui est à l'origine de l'émission de rayons gamma (γ). Leur détection est effectuée par une interaction photon-matière qui peut produire [17] :

- Un effet photoélectrique.
- Un effet Compton.
- Production de paire.

II- 2 -3- 1- Effet photoélectrique

Toute l'énergie du rayon gamma (γ) est transmise à un électron et cette énergie est approximativement égale à l'énergie du rayon gamma (γ).

II- 2 -3- 2- Effet Compton

Ce phénomène se produit lorsque seulement une portion de l'énergie du rayon gamma est transmise à l'électron.

II- 2 -3- 3- Production de paire

Un rayon gamma avec une grande énergie peut interagir avec le champ électrostatique du noyau et par conséquent la production d'une paire électron-positron.

A noter qu'à de faibles énergies l'effet photoélectrique est prédominant; une énergie au environ de 1 000 KeV favorise l'effet Compton. Cependant, si l'énergie dépasse 1 022 KeV la production de paire peut apparaître.

II- 2 -4- Quantification

La spectrométrie gamma (γ) est effectuée à l'aide de détecteurs en cristal. Le fonctionnement de ces détecteurs est basé sur la mesure de l'énergie des rayons (γ) émis par l'échantillon. Le signal obtenu est proportionnel à l'énergie absorbée. De nos jours, les détecteurs utilisés sont des semi-conducteurs Ge(Li) et, Germanium de haute pureté (HP Ge).

Si une différence de potentiel est appliquée sur la face du détecteur, les charges de polarité différentes migrent vers les électrodes respectives. Cette migration est proportionnelle à l'énergie libérée par le rayonnement incident. Le spectre est obtenu par un analyseur multicanal [14].

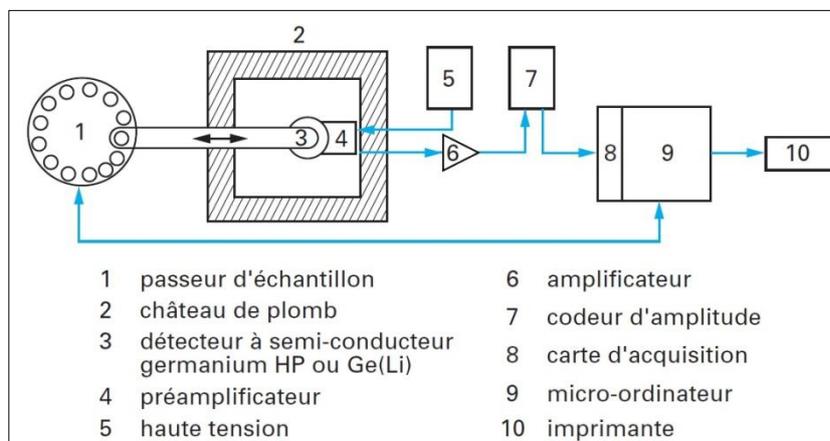


Figure II-2: Schéma d'une chaîne de spectrométrie γ utilisée en analyse par activation neutronique [15]

Les caractéristiques d'un détecteur sont [14] :

- *La résolution* : c'est la largeur de la crête à la moitié de sa hauteur exprimé en KeV (ex. pour le Co-60 il est mesuré à 1332,5 KeV pour des détecteurs coaxiaux de HPGe).
- *L'efficacité* : représentée par ε , elle exprime l'efficacité du système de comptage du détecteur

II- 3- Sources de neutrons

II- 3 -1- Sources isotopiques de neutrons

Historiquement, ce sont les sources isotopiques de neutrons qui ont été utilisées pour l'activation neutronique avant l'apparition du premier réacteur nucléaire français, en 1948, les sources isotopiques de neutrons sont, dans la plupart des cas, un mélange d'un radionucléide naturel avec un élément léger.

Elles sont portables et donnent un flux très stable de neutrons Evidemment, le flux neutronique obtenu est beaucoup moins intense que celui d'un réacteur nucléaire, cependant, ces sources trouvent leur utilité dans le dosage spécifique d'éléments majeurs (concentration de l'ordre du pour-cent) pour des problèmes particuliers.

Les neutrons sont obtenus par des réactions du type (α , n) ou (γ , n) sur des noyaux légers Les sources isotopiques de Ra (Radium) n'atteignent qu'exceptionnellement des intensités de 1Ci (soit $3,7 \times 10^{10}$ Bq⁸).

On peut utiliser également le Californium 252 (période de 2,6 ans) qui produit des neutrons par fission spontanée. 1mg de ²⁵²Cf donne $2,3 \cdot 10^9$ n/s avec une énergie de 2,3 MeV.

Les neutrons issus des sources isotopiques sont généralement thermalisés par un écran de paraffine ou de l'eau. Certaines industries se sont équipées de telles sources, pour leurs propres besoins analytiques [17].

II- 3 -2- Les accélérateurs

Ils génèrent des neutrons par différentes réactions nucléaires, les grands accélérateurs de particules, type Van de Graaff⁹ ou cyclotrons, peuvent fournir des neutrons résultant du bombardement d'une cible appropriée par des deutons, protons, alphas,... L'ordre de grandeur des flux de neutrons que l'on peut produire est de 10^8 à 10^{10} n/s en 4π .

II- 3 -3- Les réacteurs nucléaires

Les sources neutroniques les plus intenses sont fournies par les réacteurs nucléaires. Les réacteurs nucléaires de recherche sont généralement pourvus de dispositifs d'irradiation permettant l'introduction et le retrait télécommandé des échantillons irradiés.

La particule chargée, éjectée du noyau, doit surmonter la barrière de potentiel de celui-ci. De telles réactions ne peuvent se produire qu'avec des neutrons plus énergétiques (> 1 MeV).

⁸ Becquerel : L'activité d'une quantité de matières radioactives dans lesquelles il y a une désintégration du noyau par seconde.

⁹ Machine électrostatique inventée par Robert Van de Graaff au début des années 1930 qui permet d'atteindre des tensions continues très élevées, mais des courants de faible intensité, avec des différences de potentiel de l'ordre de 5 à 10 mégavolts.

Le tableau II-1 résume la comparaison entre les différents types d'analyses par activation.

Tableau II-1: Différents type d'analyses par activation [18].

Particules incidentes	Réactions nucléaires	Sources d'irradiation	Domaines d'application
Neutrons thermiques	(n, γ)	Réacteurs nucléaires	* Analyse de traces, ultra-traces et analyses multi-élémentaires. * Irradiation multiple en même temps.
Neutrons rapides	(n, p) (n, α) (n, 2n) etc.	* Accélérateurs de neutrons Sources radioactives. * Réacteurs nucléaires (irradiation sous Cd).	* Analyse multi-élémentaire de certains échantillons naturels. * Dosage de contrôle sur sites ou en milieu industriel. * Sensibilité en général moindre qu'avec les neutrons thermiques, à intensité de flux égale.
Photons gamma	(γ , n)	Accélérateurs d'électrons (accélérateurs linéaires microtron)	* Dosage des éléments légers : N, C, O, F, avec peu de risques d'interférences. * Analyse de certains éléments lourds non dosables aux neutrons (ex : Pb).

II- 4- Équations fondamentales de l'activation neutronique:

Le nombre d'atome formé (d_B^F) par unité de temps (dt) est proportionnel au nombre d'atomes cible (N_0), de la probabilité de la réaction (σ_{AB}) et le débit de particules incidentes (Φ_{AB}) on obtient [14]:

$$d_B^F = N_0 \sigma_{AB} \Phi_{AB} dt \quad (\text{II-1})$$

d_B^F : Nombre d'atome formé.

N_0 : Nombre d'atome cible.

σ_{AB} : Section efficace (probabilité d'incidence en barns¹⁰).

Φ_{AB} : Flux ou débit de particules incidentes (neutrons.cm⁻².s⁻¹).

dt : Intervalle de temps d'irradiation.

Le nombre d'atomes désexcités pendant le même temps (dt) :

$$d_B^D = N_B \lambda dt \quad (\text{II-2})$$

d_B^D : Nombre d'atomes de B désexcités.

N_B : Nombre d'atome de B présent à l'instant «t».

λ : Constante de désintégration ($\lambda = \ln 2/T$).

T : Temps de décroissance radioactive.

¹⁰ 1 barns = 10⁻²⁴ cm²

Le nombre d'atome effectivement présents par unité de temps (dt):

$$d_B^F - d_B^D = N_0 \Phi_{AB} \sigma_{AB} dt - N_B \lambda dt \quad (\text{II-3})$$

Soit :

$$\frac{dN_B}{dt} + N_B \lambda = N_0 \Phi_{AB} \sigma_{AB} \quad (\text{II-4})$$

Par l'intégration de cette relation, le nombre d'atome radioactif (N^*) à la fin de l'irradiation peut être obtenu :

$$N^* = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{II-5})$$

N^* : Le nombre de noyau radioactif.

L'activité A , défini comme étant une désintégration par seconde s'écrit :

$$A = N^* \lambda \quad (\text{II-6})$$

L'équation (II-5) devient :

$$A = \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{II-7})$$

En remplaçant N_0 par la relation (II-1) :

$$N_0 = \frac{m N_A I}{M} \quad (\text{II-8})$$

N_A : Nombre d'Avogadro ($N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ atomes/mole)

m : Le poids de l'élément recherché (grammes).

I : L'abondance isotopique de l'élément (en %).

M : La masse atomique de l'isotope irradié (grammes).

La relation (II-7) devient :

$$A = \left(\frac{1}{M}\right) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_A I (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{II-9})$$

Le sensibilité de la mesure dépend essentiellement de σ , Φ , λ et t . Pour augmenter la sensibilité le flux doit être élevé et le temps d'irradiation assez long. Dans le meilleur des cas, il est aussi préférable que σ et I soient grands.

Dans le cas où il s'est écoulé un temps t_d depuis la fin de l'irradiation l'équation de l'activité devient :

$$A = \left(\frac{1}{M}\right) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} N_A I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (\text{II-10})$$

t_i : Le temps d'irradiation de l'échantillon (seconde).

t_d : Le temps de désactivation (seconde).

Pour le calcul de la teneur de l'élément recherché, deux méthodes sont utilisées :

II- 4- 1- La méthode absolue :

Elle consiste à établir une relation entre le taux de comptage et la masse de l'élément dans un échantillon. Si σ_{AB} est exprimée en barns (1barns= 10^{-24} cm²) [19]:

$$A = 0,6 \left(\frac{1}{M}\right) m \sigma_{AB} \Phi_{AB} I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (\text{II-11})$$

En pratique, cette méthode est peu utilisée à cause de l'imprécision de la connaissance de la fluctuation du flux Φ dans l'espace et dans le temps.

II- 4- 2- La méthode relative :

Cette méthode nécessite l'utilisation des substances appelées standard, dont la composition et la teneur en éléments est connue avec exactitude, l'application de cette méthode impose l'irradiés simultanée de l'échantillon et du standard. De ce fait, l'activité de l'étalon est [19]:

$$A_R = 0,6 \left(\frac{1}{M}\right) m_S \sigma \Phi I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_{dS}} \quad (\text{II-12})$$

m_S étant connue.

L'activité de l'échantillon est :

$$A_E = 0,6 \left(\frac{1}{M}\right) m_E \sigma \Phi I (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_{dE}} \quad (\text{II-13})$$

Finalement, la masse de l'échantillon est :

$$m_E = (A_E m_S / A_S) e^{\lambda(t_{dE} - t_{dS})} \quad (\text{II-14})$$

La relation entre le taux de comptage C et l'activité A :

$$A = \varepsilon C \quad (\text{II-15})$$

ε : L'efficacité de comptage.

L'équation (II-13) devient :

$$m_E = (C_E m_S / C_S) e^{\lambda(t_{dE} - t_{dS})} \quad (\text{II-16})$$

II- 5- Avantages de la NAA :

L'analyse par activation neutronique couvre une large gamme d'analyse des éléments sans se soucier de l'aspect physique ou chimique de l'échantillon ce qui lui procure les avantages suivant [2] :

- Les échantillons peuvent être liquides, solides, en suspensions, boues ou gaz. Ils n'ont pas besoin d'être mis en solution ou vaporisés.
- Un des avantages les plus importants, est que la matrice utilisée en NAA n'interfère pas dans l'analyse, car elle est composée de H, C, O, N, P et Si qui ne forme pas de radio-isotopes. Ce qui lui confère une haute sensibilité.
- La NAA est non destructive. L'échantillon est directement analysé sans ajout de réactifs ce qui permet d'un côté de récupérer l'échantillon par la suite mais aussi éviter la contamination de ce dernier lors de la manipulation.
- La NAA requière une faible quantité de l'échantillon (100-200 mg).
- La NAA étant principalement une technique d'analyse instrumentale et avec son approche analytique, elle réduit le temps de contact du technicien avec l'échantillon ce qui la rend efficace et à prix réduit.
- C'est une technique multi-élémentaire. Elle permet une analyse simultanée de plusieurs éléments dans un même échantillon sans avoir à changer d'appareil.
- C'est une technique rapide telle qu'elle permet d'irradier plusieurs échantillons simultanément afin d'analyser plusieurs éléments dans chacun d'eux.
- Très haute sensibilité pour les éléments traces métalliques. Cela dépend du flux de neutron, de la section efficace des éléments recherchés, du temps d'irradiation, la composition de la matrice et la résolution du détecteur. A des conditions optimales, la NAA atteint ses limites théoriques pour les éléments traces.

II- 6- Limites de la NAA

- Des éléments produisant des rayons gamma (γ) avec des énergies proches peuvent créer une interférence. Cependant, ce problème est usuellement contourner par le choix d'une autre énergie d'émission pour l'un des éléments ou, en attendant que l'activité de l'élément qui a la durée de vie la plus petite disparaisse.
- La limite de détection d'un élément peut décroître lorsque le ratio de l'activité est augmenté. Réciproquement, changer l'efficacité du détecteur, le temps d'irradiation et le temps de décroissance de la radioactivité engendre l'obtention des résultats très faibles et par conséquent la limite de détection diminue.

- La limitation la plus importante est que la NAA prend beaucoup pour une analyse complète. Cela est dû au fait que la durée de vie des éléments n'est pas la même et elle est divisée en trois catégories :

- * Courte période : de quelques secondes à quelques heures.

- * Moyenne période : de quelques heures à quelques jours.

- * Longue période : à partir de quelques jours jusqu'à plusieurs années.

Pour analyser un élément de longue durée de vie, il faut attendre quelques semaines pour que l'activité des éléments courte et moyenne durée de vie soit nulle pour avoir une meilleure détection [2].

Chapitre III

La modélisation

« Toute loi physique doit avoir une beauté mathématique »

(Paul Dirac 1902-1984)



Introduction

Conçue initialement par les physiciens, la modélisation est une représentation virtuelle de phénomènes réels à partir d'algorithmes et de modèles mathématiques. La modélisation permet de refaire « virtuellement », et à volonté, une expérience en modifiant toutes les données opératoires et géométriques [20]. Le modèle sera alors numérique ou analogique [22].

La modélisation numérique : Consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique.

La modélisation analogique : Consiste à construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier. L'observation du comportement du modèle permet de tirer des enseignements sur le phénomène d'intérêt.

Le terme « Modélisation » est employé dans plusieurs domaines [21] :

- En mathématiques appliquées, et en pratique en chimie, en physique, en informatique, en météorologie ou en sciences de la vie et de la terre, la modélisation permet d'analyser des phénomènes réels et de prévoir des résultats à partir de l'application d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné.
- En ingénierie, la modélisation 3D est un cas particulier du précédent qui consiste à produire des images d'objet réel.
- En informatique, on parle de modélisation des données pour désigner une étape de construction d'un système d'information.
- En pédagogie, la modélisation de la discipline consiste en une représentation simplifiée des objets d'enseignement sous une forme plus ou moins abstraite que les apprenants auront à s'approprier.
- En conseil, la modélisation d'entreprise consiste à modéliser les différents concepts de l'Entreprise tout en les associant les uns aux autres pour offrir une vue globale, multidimensionnelle et cohérente.

Pourquoi modéliser ? :

Particulièrement utilisée dans les différents métiers de l'environnement, la modélisation permet de [20] :

- Réduire le nombre, la durée et les coûts des essais expérimentaux.
- Réduire les coûts de construction et d'exploitation des procédés.

L'avantage principal de la modélisation permet de tester différents scénarios sans contrainte d'échelles (pilote, prototype, ouvrage industriel) et de faisabilité.

Comment met-on en place une modélisation d'un procédé ?

Trois étapes sont nécessaires pour utiliser de manière optimale un outil de modélisation après avoir défini l'objectif.

1. Description des phénomènes physiques mises en jeu (transfert de chaleur, température du milieu, vitesse et direction du vent).
2. Le choix de modèles adéquats à résoudre (équations des bilans de matière), seront ensuite résolus numériquement (temps de résolution de quelques minutes à plusieurs jours de calcul).
3. Exploitation et analyse des résultats numériques pour les différents paramètres caractérisant le procédé. Afin de valider le modèle, ces résultats sont confrontés aux mesures observées.

Une fois la maquette numérique du procédé validée par rapport aux mesures réelles, elle peut être utilisée pour prédire le phénomène que ce soit pour un pilote ou pour une unité (soit environ 25 fois plus grande que le pilote) [20].

Dans le domaine de la pollution atmosphérique, l'objectif de la modélisation est de connaître, en tout point de l'espace et à tous les instants, les concentrations en espèces relâchées et d'estimer l'impact des polluants dispersés sur les populations. Il convient à ce niveau de distinguer deux types de relâchement atmosphérique [23] :

1. Celui qui fait suite à un incident ou un accident (rejet d'une bouffée de polluant par exemple) ;
2. Et celui issu du fonctionnement normal d'une installation (rejet de « routine » lié au procédé de l'installation).

Pour modéliser, ces deux situations sont traitées de manières différentes car elles ne font pas appel aux mêmes types de données, notamment météorologiques. En effet, les rejets de routine sont modélisés à partir de *statistiques* météorologiques alors que les rejets accidentels sont modélisés à partir de données météorologiques locales observées ou prévues.

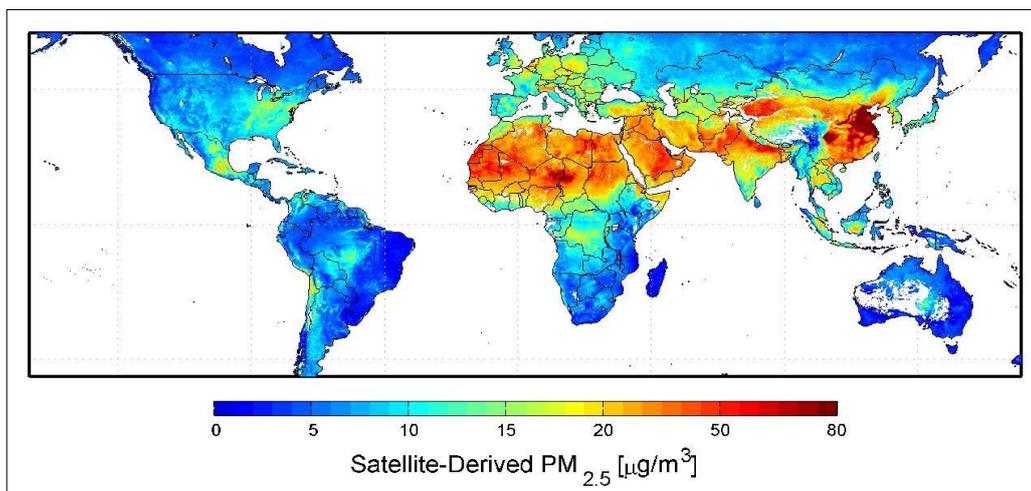


Figure III-1: Modélisation des PM_{2.5} en suspension entre 2001 et 2006 par un balayage satellitaire NASA [24].

Chapitre III : La modélisation

III- 1- Régression et ajustement

De façon informelle, un modèle explicatif est un modèle exprimant une variable Y , appelée variable à expliquer (ou réponse), comme une fonction d'une ou de plusieurs variables dites variables explicatives ou prédicteurs. Dans un modèle de régression, on cherche essentiellement à déterminer la variation de l'espérance mathématique de Y en fonction des variables explicatives. En d'autres termes on étudie comment Y évolue «en moyenne» en fonction de ces variables explicatives. Dans ce mémoire, par souci de simplification, nous ne considérons qu'une seule variable explicative ce qui constitue la régression simple. De plus cette entité. Dans sa forme la plus générale un modèle de régression simple s'écrit donc : $Y = a + b \cdot X + \varepsilon$, où ε représente l'erreur de la régression [25].

D'autres modèles de régression sont utilisés (modèle logarithmique, exponentiel, polynômial, ...) le problème revient toujours à déterminer les coefficients de la régression, on parle alors d'ajustement.

La méthode des moindres carrés établie par Gauss reprend sur l'échantillon la propriété que $Y = a + b \cdot X$ est la meilleure approximation de Y par X en moyenne quadratique. On cherche donc à ajuster au nuage des points (x_i, y_i) une droite d'équation $Y^* = \alpha + \beta \cdot X$ de telle

sorte que $\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2$ soit minimale (Figure III-2) [8].

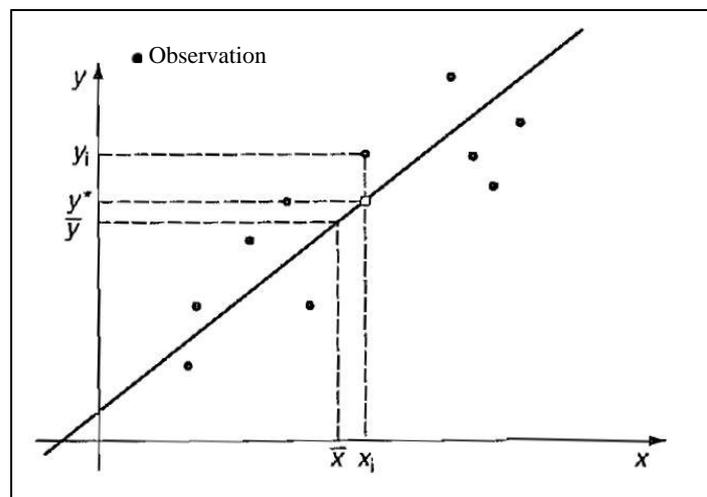


Figure III-2: Méthode des moindres carrés [27].

La méthode élémentaire de détermination de a et b est la suivante:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot X)^2 = F(a, b).$$

y_i : Ordonnée réelle.

y_i^* : Ordonnée calculée.

a, b : Coefficients de la droite de régression.

X : Abscisse de y .

Ce minimum est atteint pour $\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial b} = 0$, donc la solution est :

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{III-1})$$

\bar{y} : Moyenne des coordonnées réelles.

\bar{x} : Moyenne des ordonnées.

III- 2- Analyse en Composantes Principales

Dans la plupart des applications on observe non pas une variable par individu, mais un nombre p souvent élevé. L'étude séparée de chacune de ces variables et celles des couples selon les techniques exposées précédemment est une phase indispensable dans le processus de dépouillement des données mais tout à fait insuffisantes.

Il faut donc analyser les données en tenant compte de leur caractère multidimensionnel; l'analyse en composantes principales est alors une méthode particulièrement puissante pour explorer la structure de telles données. C'est également la mère de la plupart des méthodes descriptives multidimensionnelles.

L'étude des phénomènes climatologiques est une tâche très laborieuse vue la masse importante de données à traiter, la démarche basée sur l'analyse en composantes principales (ACP), qui est une technique d'analyse des données, permet d'extraire l'essentiel de l'information contenue dans les tableaux des données, et fournit une représentation imagée se prêtant plus aisément à l'interprétation. Celle-ci a quatre objectifs principaux [28] :

1. Répondre aux problèmes posés par des tableaux de grandes dimensions
2. Remplacer les variables initiales qui sont généralement plus ou moins liées entre elles, par des variables non corrélées, appelées Composantes Principales, (CP).
3. Réduire autant que possible le nombre des nouvelles variables (CP) à prendre en considération, toute en conservant la quasi totalité de la variance de l'ensemble des variables initiales.
4. Donner une interprétation particulière aux CP les plus importantes parmi les variables initiales.

L'analyse en composantes principales, dans son aspect qualitative, permet d'établir deux sortes de bilans :

1. Un bilan de liaisons entre les variables pouvant nous renseigner sur les points suivants :
 - * Quelles sont les variables qui sont liées positivement, et celles qui s'opposent (liées négativement).
 - * Existe-t-il une répartition en groupes des variables inter-corrélées.

2. Un bilan de ressemblance entre individus répondant aux questions suivantes :
- * Quels sont les individus qui se ressemblent et ceux qui diffèrent.
 - * Existe-t-il des groupes homogènes d'individus.

III- 2-1- Notion d'individus et observations

Dans une série de données on distingue deux ensembles : les individus X_i et les observations $X_{j/i}$ qui représentent des caractères observés sur ces individus. Le terme *individu* peut désigner selon les cas (un paramètre météorologique, concentration, âge, durée de vie...). L'ensemble des individus peut provenir d'un échantillonnage dans une population ou il peut s'agir de la population toute entière.

Le terme x_{ij} est un nombre réel qui représente la $j^{\text{ème}}$ observation sur la $i^{\text{ème}}$ variable.

		VARIABLES				
		1	i	K
INDIVIDUS	1	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots </div> <div style="text-align: center;"> x_{ik} </div> </div>				
	:					
	:					
	i					
	:					
	I					

III- 2-2- Principe de l'ACP

Le but est de construire un nouveau système d'axes avec un minimum de variables assurant un maximum de variance.

L'ACP considère i variables ($i=1,2,3,\dots,n$) pour lesquelles on dispose de j observations ($j=1,2,3,\dots,n$), donc la matrice $[X]$ est de dimension ixj tel que :

$$[X] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & x_{1n} \\ x_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & x_{(n-1)n} \\ x_{n1} & \cdot & \cdot & x_{nl} & x_{nn} \end{bmatrix}$$

Pour chaque variable X_i , nous évaluons respectivement la moyenne \bar{X}_j , la covariance entre les variables, l'écart type S_j , et la corrélation entre les variables. La matrice des covariances, notée $[R]$ est la base de l'ACP, la tâche revient à chercher les axes qui donnent un maximum de variance, nous déterminons donc les valeurs propres notées ν_i et les vecteurs propres de la matrice $[R]$, le produit de la matrice des variables concentrées réduite par matrice des vecteurs propres représente la matrice des composantes principales notée CP.

La matrice des composantes principales concentrées réduites (CP') est donnée par : $CP' = \frac{CP}{\sqrt{v}}$.

Le tracé des cercles de corrélation (représentation graphique) est donnée par : cercles de corrélation = $\frac{CP'}{\sqrt{v}} / n$.

En général une analyse en composantes principales fournit trois sources de renseignements, toutes nécessaires à l'interprétation :

1. Un tableau de vecteurs et valeurs propres.
2. Un tableau des corrélations des individus avec les axes factoriels.
3. Un tableau des corrélations des variables aux axes principaux.

Les objectifs de l'ACP cherchent à représenter graphiquement les relations entre individus par l'évaluation de leurs ressemblances, ainsi que les relations entre variables par l'évaluation de leurs liaisons.

III- 2-2-1- Interprétation de la représentation graphique

Une fois les résultats numériques obtenus, nous passons à la représentation graphique ; Chaque variable est représentée par un point dont les coordonnées sont les covariances avec les CP réduites

A partir des résultats de calculs fournis précédemment, nous pouvons interpréter les nuages de points comme suit [28] :

- Plus les valeurs d'un individu sont fortes pour une variable plus il sera éloigné de l'origine suivant l'axe factoriel décrivant le mieux cette variable.
- Un individu sera du côté des variables pour lesquelles il a de fortes valeurs, inversement il sera du côté opposé des variables pour lesquelles il a de faibles valeurs.
- Deux individus à une même extrémité d'un axe (même éloignement de l'origine) sont proches (se ressemblent).
- Deux variables très corrélées positivement sont du même côté sur un axe. Il n'est pas possible d'interpréter la position d'un individu par rapport à une seule variable, et réciproquement, il n'est pas possible d'interpréter la position d'une variable par rapport à un seul individu. *Les interprétations doivent se faire de manière globale*

Les nuages de points formés à partir des deux composants principales nous donnent l'information que les éléments des triplets (prix, quantité, alcool) et (couleur, arôme, goût) ont une relation en commun et que chaque élément de ce triplet peut être exprimé en fonction des deux autres observations voisines seulement (les quatre autres observations n'interviennent pas). Le prestige ne contribue en aucun phénomène.

Par exemple: $Prix = C_1^{st} \cdot alcool + C_2^{st} \cdot quantité + C_3^{st}$

Tableau III-1: Composantes principales extraite des sept individus [10].

PRIX	0,49125	0,71371
QUANTITE	0,63817	0,70582
ALCOOL	0,58748	0,72106
PRESTIGE	-0,61091	-0,09428
COULEUR	0,79174	-0,52303
AROME	0,76088	-0,56031
GOUT	0,74227	-0,59524

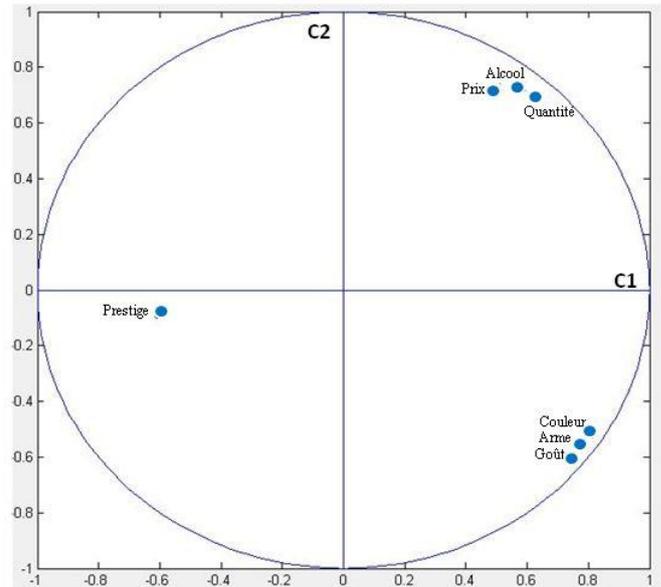


Figure III-3: Représentation de l'ACP par un nuage de point.

III- 3- Modélisation par les réseaux de neurones artificiels

Bien que le concept de la mémoire associative était introduit pour la première fois par le célèbre psychologue américain W. James en 1890, qui propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connues plus tard sous le nom de la *loi de Hebb*, l'étude des réseaux de neurones, proprement dite, date des années 1940-50. Héritière de la révolution scientifique qui mobilisait les esprits à cette période, cette discipline trouve ses sources à la fois dans les connaissances neurobiologiques de l'époque et dans un nouvel outil permettant d'explorer par simulation le comportement des modèles théorique proposés, l'ordinateur [31,32].

L'idée consiste à mettre en œuvre un système de réseaux neuronaux sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que d'après le principe biologique on aura une correspondance pour chaque élément composant le neurone biologique, donc une modélisation pour chacun d'entre eux. Cette modélisation est illustrée dans le tableau III-2, qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel [32].

Ainsi, les premiers réseaux de neurones artificiels basés sur la vision des systèmes biologiques apparaissent sous le terme perceptron proposé en 1958 par Frank Rosenblatt. Inspiré des idées de Hebb, Mc Culloch et Pitts, le perceptron était en mesure d'apprendre à calculer certaines fonctions logiques par l'exemple en modifiant ses connexions synaptiques. *Le perceptron*, qui est le réseau le plus simple possible puisqu'il est composé d'un seul neurone, a été à l'origine développé pour la reconnaissance de formes. Par la suite, Rosenblatt en 1960, donne la preuve de convergence du perceptron. Cette décennie vit aussi plusieurs travaux importants (en particulier les réflexions sur la nature du raisonnement humain de John Von Neumann, d'Alan Turing, de Alonzo Church, d'Alan Newell et de Herbert Simon) qui galvanisèrent les recherches sur le cerveau et l'esprit humain et posèrent les fondations de ce qui allait devenir *l'intelligence artificielle* [31,32].

Un neurone formel (Figure III-4) fait une somme pondérée des potentiels d'action qui lui parviennent (chacun de ces potentiels est une valeur numérique qui représente l'état du neurone qui l'a émis), puis s'active suivant la valeur de cette sommation pondérée. Si cette somme dépasse un certain seuil, le neurone est activé et transmet une réponse (sous forme de potentiel d'action) dont la valeur est celle de son activation. Si le neurone n'est pas activé, il ne transmet rien.

Dans ce modèle, les poids synaptiques (qui remplacent les boutons synaptiques du neurone biologique) pondèrent les n observations des entrées x_i . Le sommateur envoie donc dans la fonction du seuil une combinaison linéaire des n entrées. Les excitations sont simulées par les poids synaptiques positifs, et les inhibitions par les poids synaptiques négatifs

Les réseaux de neurones formels sont à l'origine une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. Les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de MM. Mac Culloch et Pitts. Ils présentent un modèle assez simple pour les neurones et explorent les possibilités de ce modèle.

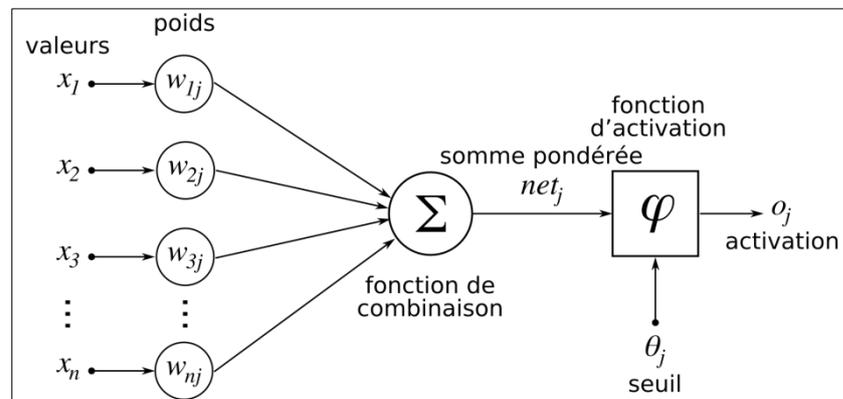


Figure III- 4: Neurone formel de Mc Culloch et Pitts

Un *réseau* de neurones artificiels (RNA) (Figure III-6) est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques (Figure III-5). Les réseaux de neurones artificiels sont devenus en quelques années des outils précieux dans des domaines très divers de l'industrie et des services. Néanmoins ils n'ont pas encore atteint leur plein développement, pour des raisons psychologiques plus que techniques, liées aux connotations biologiques du terme, et au fait qu'ils sont considérés, à tort comme des outils d'Intelligence Artificielle. Or l'intérêt des réseaux de neurones, dans le domaine des Sciences de l'Ingénieur, ne doit rien à la métaphore biologique : il est uniquement dû aux propriétés mathématiques spécifiques de ces réseaux.

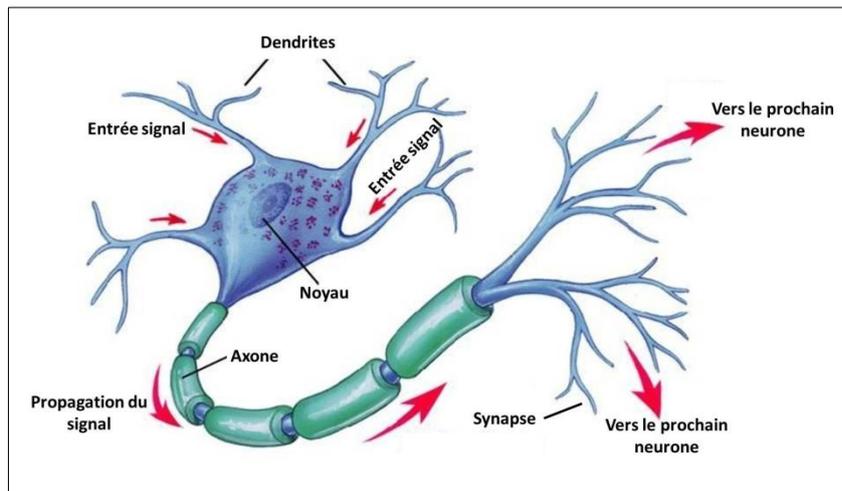


Figure III- 5: Neurone biologique [30].

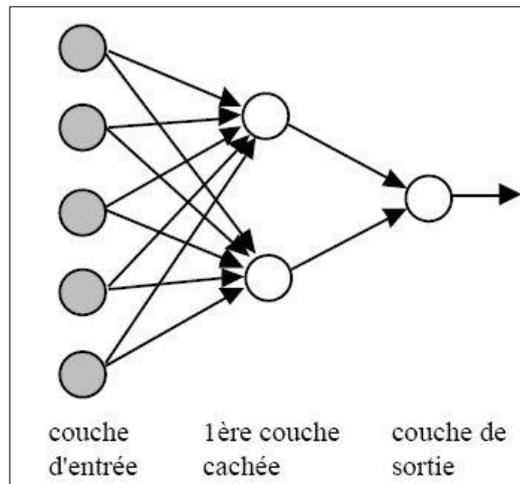


Figure III- 6: Réseau de neurones artificiels de cinq entrées, une couche cachée et une sortie.

Tableau III-2: Comparaison entre le neurone biologique et le neurone artificiel [31,34,35].

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapse	Signal de sortie
Axone	Poids de connexions
Dendrite	Signal d'entrée
Noyau	Fonction d'activation

Un réseau de neurones artificiels, est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie. Un réseau de neurones est donc considéré comme un filtre non linéaire à temps discret [33].

III- 3-1- Avantages des RNA

Par rapport aux modèles classiques d'analyse statistique, les réseaux de neurones artificiels possèdent plusieurs avantages [34] :

- Ils permettent de traiter des problèmes non structurés, c'est-à-dire des problèmes sur lesquels on ne dispose d'aucune information *a priori*. En particulier, on notera qu'il n'est pas nécessaire de connaître la distribution de probabilité des variables, ce qui n'est pas le cas dans la plupart des modèles d'analyse statistique sauf s'il s'agit d'analyses non paramétriques.
- En découvrant eux-mêmes les relations entre les variables, ils sont tout à fait adaptés pour traiter des problèmes non linéaires éminemment complexes. Cet aspect est tout à fait intéressant car il n'oblige pas à s'interroger sur la forme de la fonction à estimer.
- Ils peuvent travailler sur des données incomplètes ou des données bruitées. L'incomplétude des données peut être prise en compte par l'ajout de neurones supplémentaires.
- L'arrêt du processus itératif lorsque le réseau produit les meilleurs résultats sur l'échantillon de validation lui confère une certaine robustesse. On peut en effet considérer que de cette manière, seule l'information pertinente est intégrée dans le système. Les bruits qui pourraient concourir à la spécialisation du réseau ne sont pas intégrés.
- Ils permettent la prise en compte de variables qualitatives à travers des neurones recevant des valeurs binaires.

III- 3-2- limites des RNA

Malgré les nombreux avantages, la puissance de régression et les intérêts pratiques offerts par les réseaux de neurones, les RNA possèdent des inconvénients qui se résume dans [35] :

- *Architecture du réseau* : Le nombre de sous couches et le nombre de neurones dans chaque sous couche sont généralement fixés par l'application, mais il n'y a aucune règle précise pour déterminer ces derniers.
- *Explicabilité* : Il est quasi-impossible d'expliquer de manière compréhensible les résultats fournis par un RNA. Un RNA peut découvrir empiriquement des lois et les exploiter dans la résolution de problèmes, mais il ne peut pas formuler ces lois.
- *Processus d'apprentissage* qui peut être extrêmement long.
- *Paralysie du réseau* : les poids synaptiques deviennent si grands que leur modification est inopérante sur le comportement des neurones (dépassement de la zone de variation de la sigmoïde)
- *Surspécification* : Lorsque l'apprentissage est trop prolongé, le RNA perd son pouvoir de généralisation. Il reconnaît les données de l'échantillon d'apprentissage, mais plus de nouvelles données « similaires ».

III- 3-3- Architecture des RNA

Un réseau de neurones artificiel est organisé en couches, chacune de ces couches est composée de plusieurs neurones. Chacun de ces neurones qui se présente comme une unité de calcul autonome, est relié à la totalité ou à certains neurones de la ou des couches précédentes (Figure III-6) [34].

Les neurones sont reliés entre eux par l'intermédiaire de poids synaptiques, notés $W_{i,j}$. (Figure III-7). L'algorithme d'apprentissage aura pour tâche d'évaluer ces poids en fonctions des données présentées lors de la phase d'apprentissage. Il est à noter que certains réseaux plus complexes peuvent rajouter des connexions directes entre la couche d'entrée et la couche de sortie [34].

Dans le domaine qui nous intéresse, les neurones disposés sur la couche d'entrée reçoivent les informations censées expliquer le phénomène à analyser.

Le nombre de neurones cachés, et l'agencement des neurones entre eux, de telle manière que le réseau soit en mesure de reproduire ce qui est déterminé dans les données, le nombre de poids ajustables est un des facteurs fondamentaux de la réussite d'une application : Si le réseau possède un trop grand nombre de poids, c'est-à-dire si le réseau est trop "souple", il risque de s'ajuster au bruit qui est présent dans les données de l'ensemble d'apprentissage, et, même en l'absence de bruit, il risque de présenter des oscillations non significatives entre les points d'apprentissage, donc se posséder de mauvaises propriétés d'interpolation ; Si ce nombre est trop petit, le réseau est trop "rigide" et ne peut reproduire la partie déterministe de la fonction. Le problème de la détermination de l'architecture optimale est resté pendant longtemps un problème ouvert [36].

III- 3-4- Les poids des connexions

Les poids des connexions entre un neurone et un autre sont des valeurs aléatoires d'une fonction Gaussienne¹¹.

Dans le cas où les poids du réseau sont estimés à partir des exemples, en minimisant l'erreur d'approximation sur les points de l'ensemble d'apprentissage, de telle manière que le réseau réalise la tâche désirée. Ce calcul des coefficients synaptiques constitue *l'apprentissage supervisé* pour le réseau de neurones [36].

III- 3-5- Les fonctions de transfert

Chaque neurone collecte les informations fournies par les neurones de la couche précédente avec lesquels il se trouve en relation et calcule alors son potentiel d'activation. Celui-ci est ensuite transformé par une fonction pour déterminer l'impulsion envoyée aux neurones de la couche suivante (potentiel de sortie) (Figure III-7).

L'activation d'un neurone est donnée par la somme des potentiels de sortie de ses prédécesseurs, pondérée par les poids synaptiques. Ce potentiel d'activation est ensuite transformé par une fonction afin de déterminer le potentiel de sortie.

En principe, toute fonction choisie croissante et impaire peut être utilisée, mais le plus souvent on fait appel à des fonctions ramenant le résultat à l'intérieur des bornes prédéfinies. Plusieurs

¹¹ Fonction en exponentielle de l'opposé du carré de l'abscisse ($F(x) = e^{-x^2}$)

fonctions répondant à cet impératif peuvent être envisagées, mais les plus communément utilisées sont : La fonction sigmoïde et la fonction linéaire.

y_i : Signal d'entrée.
 w_i : Poids des connexions.
 f : Fonction de transfert

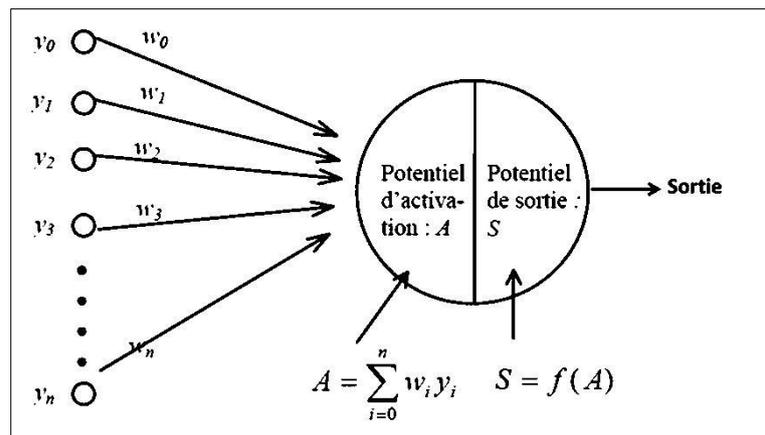


Figure III- 7: Opération neuronale fondamentale.

Fonction **LOGSIG**

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

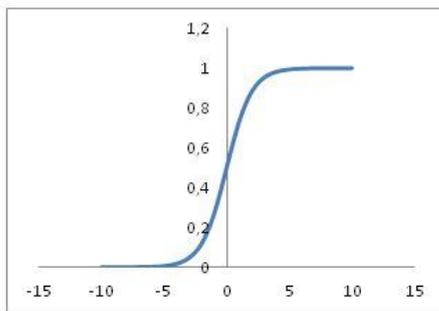


Figure III-9: Fonction Logsig.

Fonction **TANSIG**

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$$

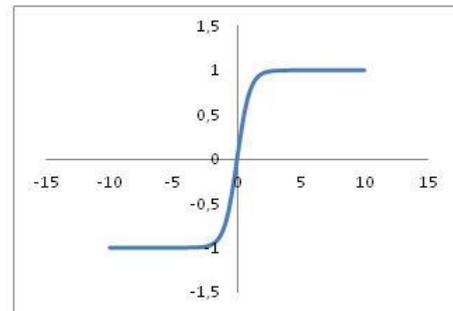


Figure III-8: Fonction Tansig.

III- 3-6- L'apprentissage

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Elle ne concerne cependant pas tous les modèles, mais les plus utilisés. L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples ou à des observations.

Durant cette phase de fonctionnement, le réseau adapte les poids des connexions afin de fournir sur ses neurones de sortie les valeurs désirées. Cet apprentissage nécessite des exemples désignés aussi sous l'appellation *d'échantillon d'apprentissage* qui représente 80% de la totalité des observations, les 20% restantes serviront comme test qui nous permettra de valider ou de rejeter les poids des connexions calculés par l'algorithme d'apprentissage.

Après initialisation des poids du réseau (en général des valeurs aléatoires), il y a présentation des exemples au réseau et calcul des sorties correspondantes. Une valeur d'erreur ou de correction est calculée et une correction des poids est appliquée.

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il a été défini deux grandes classes selon que l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé. Cette distinction repose sur la forme des exemples d'apprentissages [32] :

Apprentissage supervisé : L'apprentissage est dit supervisé lorsque les exemples sont constitués de couples de valeurs du type : (valeur d'entrée, valeur de sortie désirée). Tout le problème d'apprentissage supervisé consiste, étant donné un ensemble d'apprentissage E de N couples (entrée - sortie désirée (x_i, y_i)) à déterminer le vecteur des poids W_i d'un réseau.

Apprentissage non supervisé : L'apprentissage est qualifié de non supervisé lorsque seules les valeurs d'entrée sont disponibles. Dans ce cas, les exemples présentés à l'entrée provoquent une auto-adaptation du réseau afin de produire des valeurs de sortie qui soient proches en réponse à des valeurs d'entrée similaires (de même nature).

III- 3-6-1- Algorithmes d'apprentissage

L'apprentissage c'est l'étape la plus cruciale dans la construction d'un réseau de neurone, cependant il existe plusieurs algorithmes utilisés pour faire l'apprentissage des RNA, dans le cadre de cette étude on citera l'algorithme de Levenberg-Marquardt qui est le plus rapide et qui assure la meilleure convergence vers un minimum de l'erreur quadratique avec un minimum d'itérations, pour les problèmes d'approximation des fonctions où le nombre des poids du réseau est inférieur à cents. Quand le nombre de poids augmente l'efficacité de l'algorithme LM diminue, car la taille du Hessien augmente et nécessite une très grande place dans la mémoire, cet algorithme est pauvre pour les problèmes de classification [32].

III- 3-6-1-1- Algorithme de Levenberg-Marquardt

La procédure de l'algorithme est itérative. On part d'un paramètre initial, que l'on suppose « assez proche » d'un minimum, et qui constituera le vecteur \mathbf{p} de départ. Dans beaucoup de cas, un paramètre de départ « standard », tel que $\mathbf{p}^T = (1, 1, \dots, 1)$ fonctionnera sans problème. Dans certains cas, il n'y a convergence que si le vecteur de départ n'est pas trop éloigné de la solution.

À chaque itération, on remplace \mathbf{p} par une nouvelle estimation $\mathbf{p} + \mathbf{q}$. Afin de déterminer \mathbf{q} , les fonctions $f_i(\mathbf{p} + \mathbf{q})$ sont approchées en étant linéarisées :

$$f(\mathbf{p} + \mathbf{q}) \approx f(\mathbf{p}) + \mathbf{J}\mathbf{q}$$

Où on a noté \mathbf{J} la Jacobienne de \mathbf{f} en \mathbf{p} .

À un minimum de la somme des carrés S , on a $\nabla_q S$. En dérivant le carré de l'expression d'ajustement, qui s'annule donc, on obtient :

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J})\mathbf{q} = \mathbf{J}^T [\mathbf{y} - \mathbf{f}(\mathbf{p})]$$

D'où l'on tire aisément \mathbf{q} en inversant $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$. Dans l'inversion matricielle, tout va dépendre du rapport entre la valeur propre la plus "grande" en norme, et la valeur propre la plus petite ; ce rapport, appelé *conditionnement de matrice*, va concrètement refléter la *robustesse de l'algorithme face au bruit*. Le point essentiel de l'algorithme de Levenberg-Marquardt est d'approcher cette équation, en l'amortissant un peu. (On parle alors de "chargement de la

diagonale" afin de contourner le mauvais conditionnement le cas échéant, problème que l'on retrouve avec l'algorithme de Capon et que l'on peut résoudre par le procédé "Single Value Decomposition") :

$$(J^T J + \lambda \cdot \text{diag}(J^T J))q = J^T [y - f(p)].$$

Le facteur d'amortissement positif λ est ajusté à chaque nouvelle itération. Si la diminution de S est rapide, on peut utiliser une valeur plus faible. Si en revanche une itération est peu efficace, on peut augmenter λ .

Si on a effectué plus d'un certain nombre d'itérations, ou bien que l'on s'est approché suffisamment d'un minimum, la procédure se termine et renvoie le paramètre \mathbf{p} comme estimation de la solution.

III- 3-6-1-2- Régularisation bayésienne

La technique de régularisation consiste à imposer des contraintes, donc à apporter une information supplémentaire, sur l'évolution des poids du réseau de neurones. Par exemple, on peut volontairement pénaliser les poids trop grands selon la formule :

$$F_{\text{erreur}} = \frac{1}{N} \sum e_i^2 \quad \text{et} \quad F_{\text{poids}} = \frac{1}{N} \sum w_i^2$$

Ce qui donne :

$$F_{\text{new}} = \gamma F_{\text{erreur}} + (1-\gamma) F_{\text{poids}}$$

Où γ est un paramètre d'optimisation. Mais le problème réside dans le choix de la valeur de ce paramètre.

La régularisation bayésienne, qui suppose que les poids et les biais suivent des distributions spécifiques (les paramètres sont estimés au fur et à mesure de l'apprentissage) donne en général des résultats très satisfaisants.

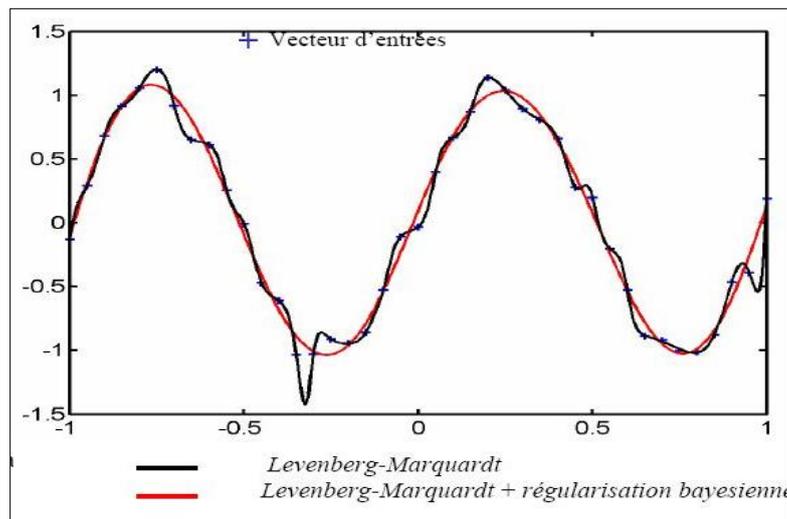


Figure III-10: Comparaison entre l'apprentissage avec l'algorithme de LM seul et l'algorithme LM+régularisation bayésienne [33].

III- 3-7- Fonction de coût.

La fonction de coût doit permettre de mesurer l'écart entre le modèle et l'observation, la fonction de coût est non linéaire au regard des poids synaptiques. Elle dispose également d'une borne inférieure et moyennant quelques précautions lors de l'apprentissage, les procédures d'optimisation finissent par aboutir à une configuration stable au sein du réseau de neurones. Si cet écart est important, la fonction de coût doit être grande, et inversement. Il existe un grand nombre de fonctions possibles, dans le cadre de ce mémoire, nous présenterons les fonctions les plus explicatives et les plus utilisées.

III- 3-7-1- La rétropropagation de l'erreur

Une méthode qui permet de calculer le gradient de l'erreur pour chaque neurone d'un réseau de neurones, de la dernière couche vers la première. De façon abusive, on appelle souvent technique de rétropropagation du gradient, l'algorithme classique de correction des erreurs basé sur le calcul du gradient grâce à la rétropropagation. En vérité, la correction des erreurs peut se faire selon d'autres méthodes, en particulier le calcul de la dérivée seconde. Cette technique consiste à corriger les erreurs selon l'importance des éléments qui ont justement participé à la réalisation de ces erreurs. Dans le cas des réseaux de neurones, les poids synaptiques qui contribuent à engendrer une erreur importante se verront modifiés de manière plus significative que les poids qui ont engendré une erreur marginale [32,36,37].

Les poids dans le réseau de neurones sont au préalable initialisés avec des valeurs aléatoires (*random* en anglais). Chaque échantillon possède ses valeurs cibles qui sont celles que le réseau de neurones doit à terme prédire lorsqu'on lui présente le même échantillon.

L'algorithme se présente comme ceci :

- Soit un échantillon \vec{x} que l'on met à l'entrée du réseau de neurones et la sortie recherchée pour cet échantillon \vec{t}
- On propage le signal en avant dans les couches du réseau de neurones : $x_k^{(n-1)} \mapsto x_j^{(n)}$
- La propagation vers l'avant se calcule à l'aide de la fonction d'activation g , et des poids synaptiques \vec{w}_{jk} entre le neurone $x_k^{(n-1)}$ et le neurone $x_j^{(n)}$.
- Lorsque la propagation vers l'avant est terminée, on obtient à la sortie le résultat \vec{y}
- On calcule alors l'erreur entre la sortie donnée par le réseau \vec{y} et le vecteur \vec{t} désiré à la sortie pour cet échantillon. Pour chaque neurone i dans la couche de sortie, on calcule : $e_i^{sortie} = g'(h_i^{sortie})(t_i - y_i)$
- On propage l'erreur vers l'arrière $e_i^{(n)} \mapsto e_j^{(n-1)}$ grâce à la formule suivante :

$$e_j^{(n-1)} = g'^{(n-1)}(h_j^{(n-1)}) \sum_i w_{ij} e_i^{(n)}$$

note:
$$e_j^{(n)} = \sum_i [t_i - y_i] \frac{\partial y_i}{\partial h_j^{(n)}}$$

➤ On met à jour les poids dans toutes les couches :

$$\Delta w_{ij}^{(n)} = \lambda e_i^{(n)} x_j^{(n-1)} \quad \text{où } \lambda \text{ représente le taux d'apprentissage (de faible magnitude et inférieur à 1)}$$

La Figure III-11 schématise le principe de la rétropropagation de l'erreur.

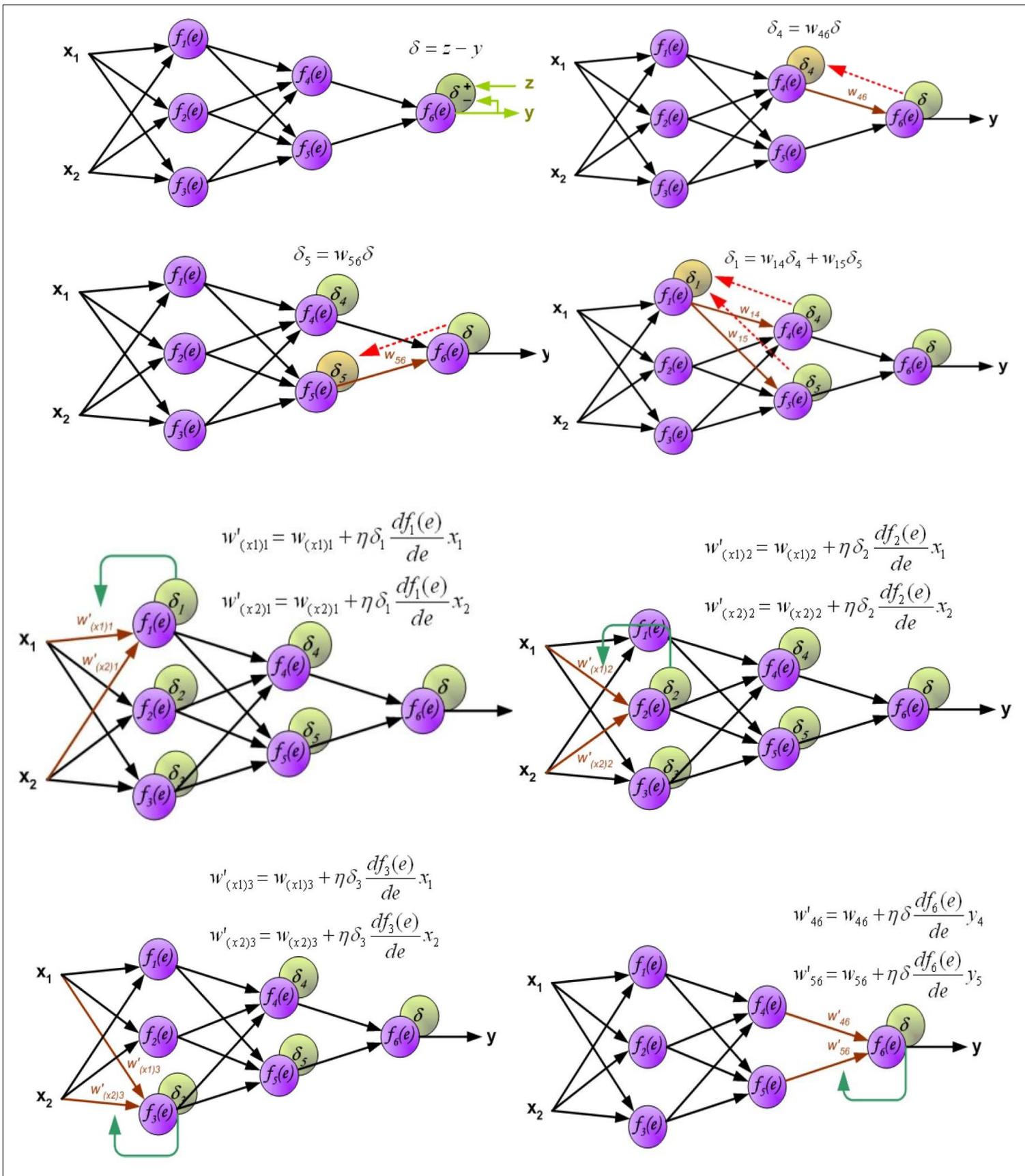


Figure III-11: Principe de la rétropropagation [37].

III- 3-8- La mise en œuvre d'un réseau de neurone

Nous avons exposé les éléments essentiels qui permettent de comprendre pourquoi, et dans quels cas, il est avantageux de mettre en œuvre des réseaux de neurones. En présentant quelques applications typiques, nous avons tenté de montrer, de manière concrète, ce que l'ingénieur peut attendre de cette technique. S'ils sont bien compris et convenablement utilisés, les réseaux de neurones peuvent rendre des services considérables dans des domaines très variés.

Résumons donc les points fondamentaux qu'il convient de toujours garder à l'esprit lorsque l'on cherche à mettre en œuvre des réseaux de neurones :

- Le choix de l'architecture qui convient le mieux avec le phénomène à modéliser, l'utilisation d'une architecture contenant énormément de sous couche et de neurone n'implique pas la performance du réseau.
- Le choix des fonctions de transfert, généralement on attribue une fonction de type *pureline* aux neurones de sorties.
- La division de l'ensemble des observations en deux groupes : 80% des observations pour l'apprentissage et 20% pour le test.
- Le choix de l'algorithme de l'apprentissage, l'algorithme de Levenberg-Marquardt est le plus souvent utilisé dans le même genre de phénomène à expliquer que celui de ce mémoire.
- Le choix de la fonction de coût.
- Une fois que la phase de l'apprentissage est terminée, on testera le réseau en comparant les valeurs modélisées avec celles du test.

III- 4- Modélisation des séries temporelles

Une série temporelle, ou série chronologique, est une suite de valeurs numériques représentant l'évolution d'une quantité spécifique *au cours du temps*. De telles suites de valeurs peuvent être exprimées mathématiquement afin d'analyser le comportement, généralement pour comprendre son évolution passée et pour en prévoir le comportement futur. Une telle transposition mathématique utilise le plus souvent des concepts de probabilités et de statistique.

Les séries temporelles sont considérées à tort comme étant une branche exclusive de l'économétrie. Cette dernière est une discipline qui est relativement jeune alors que les séries temporelles ont été utilisées bien avant, par exemple en astronomie (1906) et en météorologie (1968).

C'est de la déception des prévisions issues des modèles structurels d'inspiration keynésienne¹² qu'est née la théorie des séries temporelles telle qu'on la connaît aujourd'hui. Et sur ce point, c'est la publication de l'ouvrage de Box et Jenkins en 1970 qui a été décisive [40].

¹² Ecole de pensée économique fondée par l'économiste britannique John Maynard Keynes.

III- 4-1- L'autocorrélation.

L'autocorrélation est un outil mathématique souvent utilisé en traitement du signal. C'est la corrélation croisée d'un signal par lui-même. L'autocorrélation permet de détecter des régularités, des profils répétés dans un signal comme un signal périodique perturbé par beaucoup de bruit, ou bien une fréquence fondamentale d'un signal qui ne contient pas effectivement cette fondamentale, mais l'implique avec plusieurs de ses harmoniques.

En statistique, l'autocorrélation d'une série temporelle discrète ou d'un processus X_t est simplement la corrélation du processus par rapport à une version décalée dans le temps de lui-même. Si X_t est un processus stationnaire d'espérance μ alors la définition est

$$R(k) = \frac{E[(X_i - \mu)(X_{i+k} - \mu)]}{\sigma^2} \quad (\text{III-12})$$

Où E est l'espérance mathématique et k est le décalage temporel, σ^2 est la variance et μ la moyenne de la série. C'est une fonction à valeur dans l'intervalle $[-1, 1]$ avec 1 indiquant une parfaite corrélation (Les signaux se recouvrent exactement quand le temps est décalé de k) et -1 indiquant une parfaite anti-corrélation. Il est d'usage pratique dans de nombreuses disciplines de tracer la normalisation par σ^2 et d'utiliser le terme *autocorrélation* sans distinction avec celui d'*autocovariance* [40].

III- 4-2- Le lissage exponentiel simple

Les méthodes de lissages exponentiels constituent un outil permettant de réaliser des prévisions à partir de l'observation d'une série temporelle. Ces méthodes étant relativement basiques et simples à mettre en œuvre [41].

Disposant d'une série temporelle x_1, x_2, \dots, x_n , l'objectif du lissage exponentiel est d'estimer la valeur x_{n+h} non encore observée. Nous noterons $\hat{x}_{n,h}$ cette prévision.

Etant donnée une constante de lissage $0 < \omega < 1$, on définit la *prévision par lissage exponentiel simple* (LES) :

$$\hat{x}_{n,h} = \omega \sum_{i=0}^n (1-\omega)^i x_{n-i}$$

La prévision est une moyenne de toutes les observations passées, pondérée de sorte à ce que plus l'observation soit ancienne moins elle ait d'importance.

Une constante de lissage ω proche de 0 (≤ 0.3) donne une importance significative aux observations éloignées, tandis qu'un ω proche de 1 (≥ 0.7) tend à négliger ces observations éloignées.

Formules récursives de mise à jour : La définition (III-12) vérifiant la formule récursive suivante : $\hat{x}_{n,h} = \omega x_n + (1-\omega) \hat{x}_{n-1,h}$

La prévision $\hat{x}_{n,h}$ peut être obtenue immédiatement à partir de la connaissance de :

- La prévision $\hat{x}_{n-1,h}$ basée sur les $n - i^{\text{èmes}}$ premières observations.
- L'observation x_n .

L'utilisation de cette récurrence permet de réaliser des algorithmes très rapides d'estimation de la prévision par lissage exponentiel (en initialisant $\hat{x}_{1,h} = x_1$).

Pour choisir la constante de lissage, une solution pragmatique consiste à tester plusieurs valeurs et à choisir celle minimisant un critère d'erreur minimale. Pour cela on partage l'échantillon d'observations en un échantillon d'apprentissage (les 80% premières observations) et un échantillon test (les 20% dernières observations), on estime le modèle de lissage exponentiel à partir de l'échantillon d'apprentissage, et on évalue l'erreur sur l'échantillon test. On répète cette opération pour plusieurs valeurs de la constante de lissage α , et on choisit celle conduisant à l'erreur la plus petite.

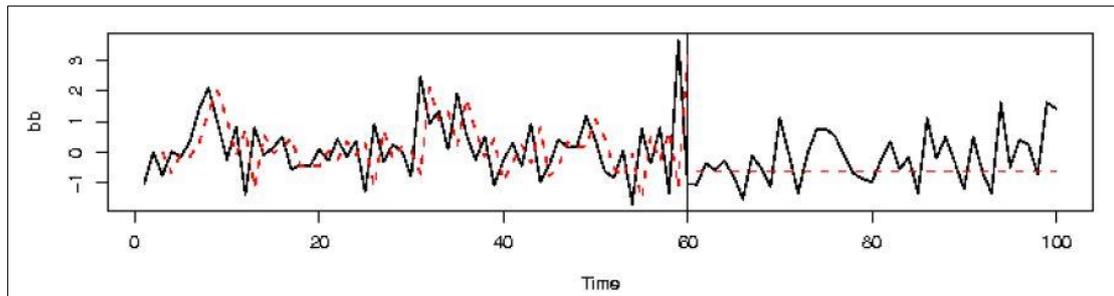


Figure III-12: Exemple lissage exponentiel simple [41].

III- 4-3- Le lissage exponentiel double

Comme son nom l'indique, la technique du lissage exponentiel double (LED) consiste à effectuer un lissage à une série déjà lissée, donc plus précise que LES. On ajuste au voisinage de l'instant n une droite d'équation $y_t = a + b(t - n)$. Les formules générales du LED sont les suivantes [41] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_t = \omega \cdot x_{t-1} + (1 - \omega) \cdot \hat{x}_{t-1} \\ \hat{\hat{x}}_t = \omega \cdot \hat{x}_t + (1 - \omega) \cdot \hat{\hat{x}}_{t-1} \\ \bar{\omega} = \frac{1 - \omega}{\omega} \\ a_t = 2 \cdot \hat{x}_t - \hat{\hat{x}}_t \\ b_t = \frac{1}{\bar{\omega}} (\hat{x}_t - \hat{\hat{x}}_t) \\ x_{t-1,t}^p = a_t + b_t \end{array} \right.$$

Le paramètre ω , appelé la constante de lissage, joue un rôle important :

- Lorsque ω est proche de 0, la pondération s'étale sur un grand nombre de termes du passé, la mémoire du phénomène étudié est forte et la prévision est peu réactive aux dernières observations.
- Lorsque ω est proche de 1, les observations les plus récentes ont un poids prépondérant sur les termes anciens, la mémoire du phénomène est faible et le lissage est très réactif aux dernières observations.

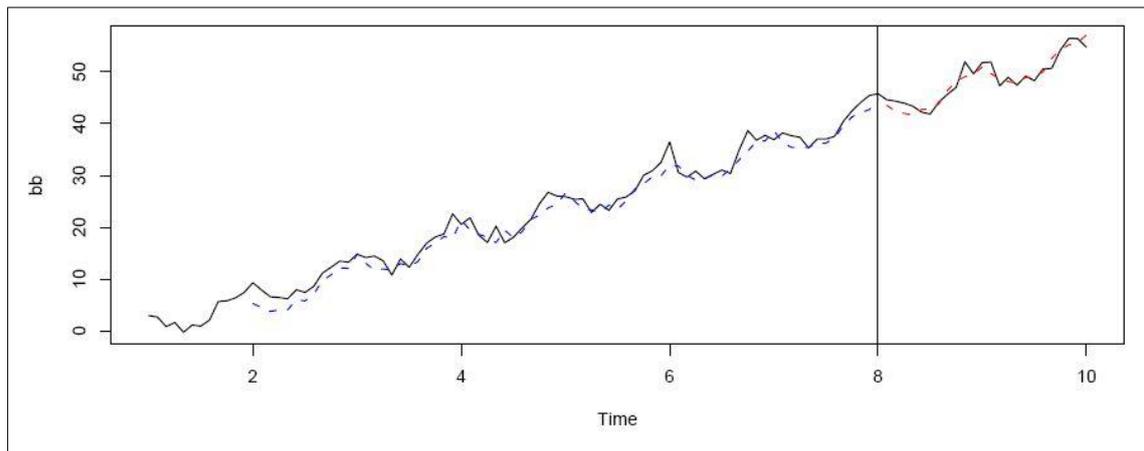


Figure III-13: Exemple lissage exponentiel double [41].

III- 4-4- Modélisation par le modèle ARMA

Publié pour la première fois par Wold en 1954, en 1970 Box et Jenkins rassemblent tous les travaux issus de la publication de Wold dans une méthodologie itérative ayant pour but la prévision d'une chronologie. Cette classe plus générale de modèles définit des processus sous la forme d'une récurrence autorégressive avec un second membre de type moyenne mobile.

Un processus ARMA (Auto Régressive Moyenne Average en anglais) d'ordres p et q est de la forme [41] :

$$X_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}$$

Où les *termes d'erreurs* ε_i ($t - q \leq j \leq t$) sont des bruits blancs centrés de variance σ^2 indépendants du processus, les paramètres φ_i et θ_i sont constants.

- Un *modèle autorégressif* $AR(p)$ est un ARMA ($p,0$).
- Un *modèle moyenne mobile* $MA(q)$ est un ARMA ($0,q$).

Chapitre IV

Méthodologie expérimentale

« Que la stratégie soit belle est un fait, mais n'oubliez pas de regarder le résultat ;
Une suite de petites volontés fait un gros résultat »

(Cesare Lombroso 1835-1909)



Chapitre IV : Méthodologie expérimentale

Description de la zone d'étude

Notre site d'étude « Centre de Recherche Nucléaire de Draria » se situe à la banlieue de la commune de Draria wilaya d'Alger (la capitale de l'Algérie), peuplée de 44 141 habitants et qui se trouve à environ 10 Km au Sud-Ouest du centre de la capitale [45].

La zone d'étude est localisée aux coordonnées géographiques suivantes avec le logiciel Google Earth Pro: 36°43'32,18''Nord et 3°00'29,15''Est.



IV- 1- Matériels

IV- 1- 1- Dispositif d'échantillonnage

L'objectif de cette étude c'est la quantification de la pollution atmosphérique au niveau de Draria en TSP et en ETM associés à ces TSP, pour ce faire, le choix du site de prélèvement est primordial et qui doit répondre aux exigences suivantes :

- L'homogénéité de l'air à prélever.
- L'absence des contraintes (obstacles) entre l'air et le dispositif de prélèvement.

Notre échantillonnage est un prélèvement de l'air avec un dispositif de prélèvement (Figure IV-1). Le dispositif de prélèvement est installé au niveau de la terrasse de la division DPAN (Division de Physique et Applications Nucléaires) sur une altitude de 17,5m par rapport au niveau du sol, ce dernier est à 200m d'altitude par rapport au niveau de la mer.

Le préleveur est composé des quatre équipements suivants (Figure IV-2) :

1. Corps de protection : conçu pour fixer la tête d'aspiration ainsi pour la protection du filtre de prélèvement contre la pluie, oiseaux...
2. Porte filtre ou cassette fixé dans une tête de prélèvement en inox.
3. Pompe d'aspiration : pour aspirer l'air, réglée à un débit d'aspiration fixe.
4. Volumètre : quantification du volume d'air aspiré.

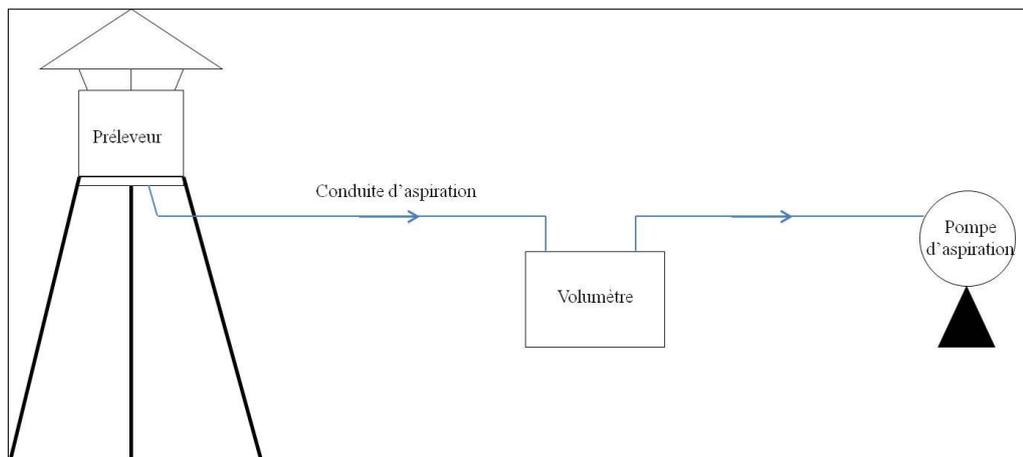
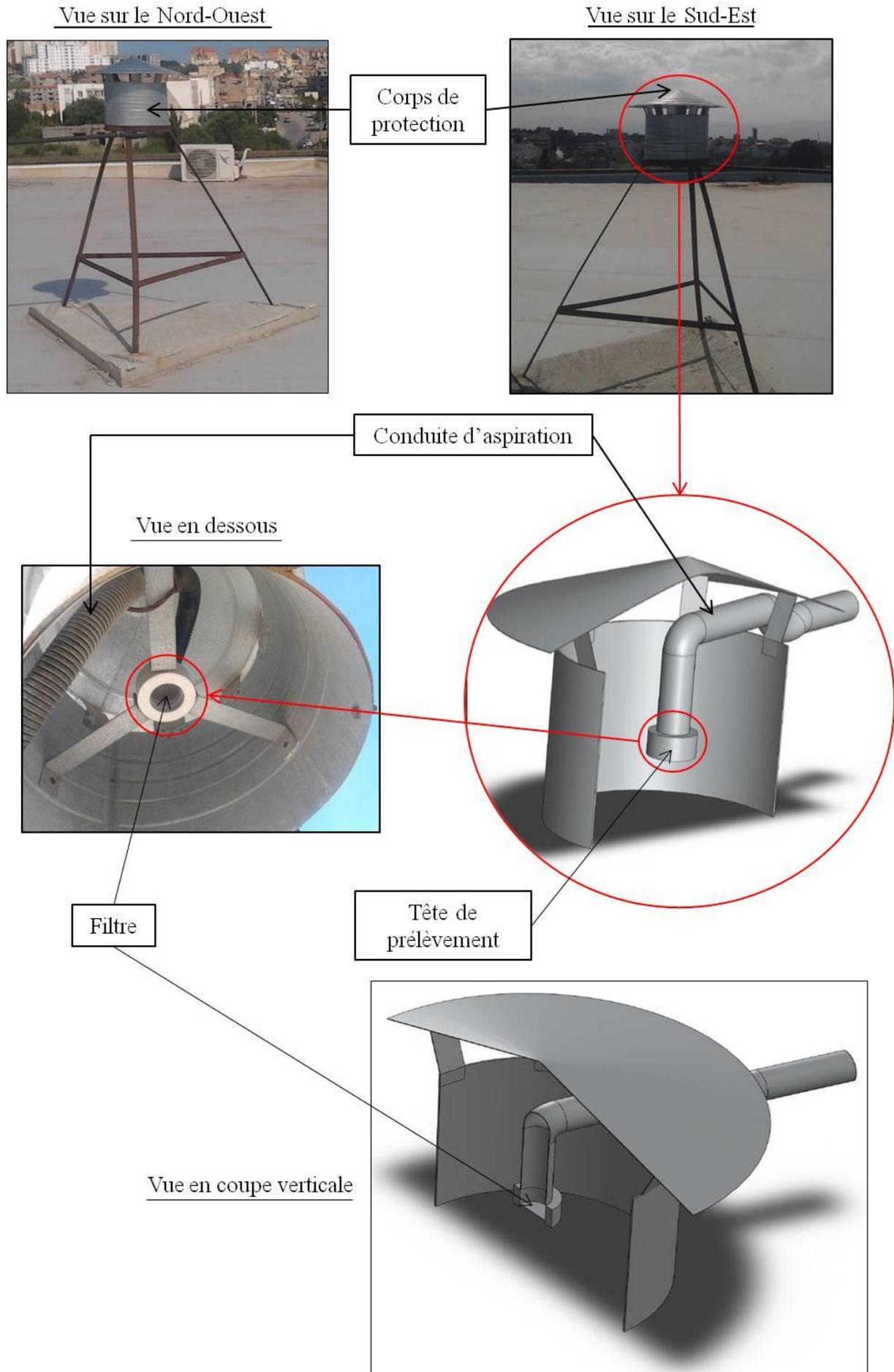


Figure IV-1: Schéma illustrant les connexions entre les équipements de prélèvement.



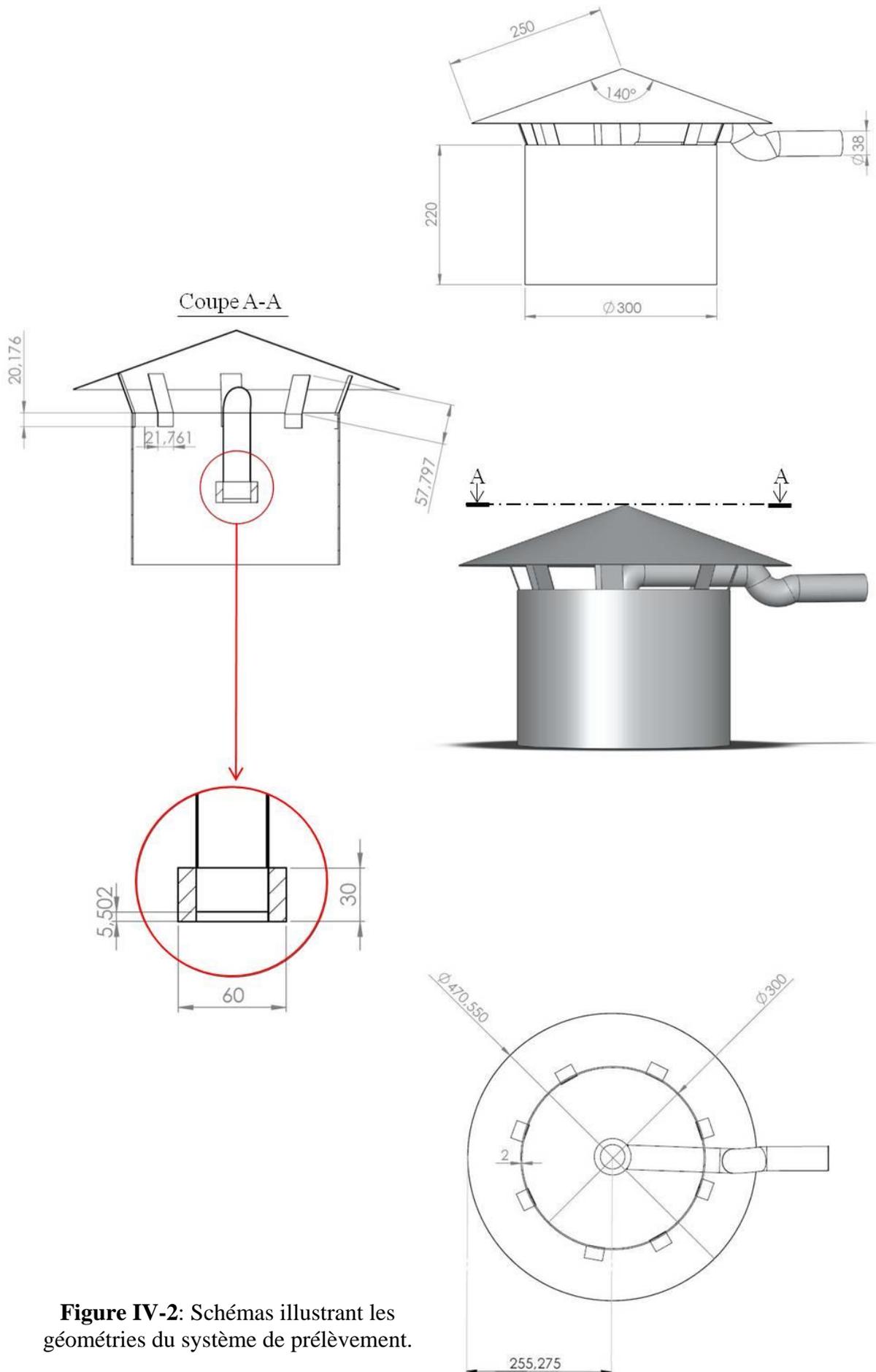


Figure IV-2: Schémas illustrant les géométries du système de prélèvement.

IV- 1- 2- Etude des TSP

Après l'échantillonnage, nous avons quantifié les TSP dans l'air échantillonné à l'aide d'une balance analytique dotée d'une précision de 0,1mg.

IV- 1- 3- Etude des ETM associés aux TSP

Nous avons opté pour l'analyse de nos échantillons (filtres) la méthode d'analyse par activation neutronique en se basant sur ses nombreux avantages (la haute sensibilité, la non destruction de l'échantillon, multi-élémentaire...), l'analyse de nos échantillons par analyse par activation neutronique s'est déroulée au niveau des canaux d'irradiation du réacteur nucléaire NUR de Draria.

IV- 1- 3- 1- Le réacteur NUR de Draria

Le réacteur nucléaire est un dispositif de contrôle des réactions en chaîne, il est de très loin la meilleure source de neutrons avec un flux allant jusqu'à 10^{14} n/cm².s. Un réacteur nucléaire peut produire un faisceau de neutrons très intense avec différentes types d'énergie (thermique, épithermique, rapide).

Le Réacteur NUR est un réacteur de recherche ouvert de type piscine, doté d'une grande flexibilité expérimentale, sa puissance nominale est de un (01) Mégawatt. Le flux neutronique thermique de ce réacteur atteint une intensité de 10^{13} n / cm² .sec .

Le réacteur dispose des sites d'irradiation verticaux dans le cœur et dans la colonne thermique, et cinq canaux d'irradiation horizontaux.

Les autres principaux constituants du réacteur nucléaire NUR sont :

- Le cœur.
- Le système de refroidissement.
- La protection biologique.
- Les canaux d'irradiation.

Le transfert des échantillons vers les sites d'irradiations s'effectue soit par voie manuelle, soit par voie pneumatique. La voie manuelle est utilisée pour les longues durées d'irradiation pour l'analyse des radioéléments de longue période tel que le fer, le sélénium ou le cobalt. L'analyse des radioéléments de courte période (chlore, Manganèse, vanadium,...) nécessite l'utilisation de l'un des deux systèmes de convoyages rapides suivants :

1. Le système de convoyage pneumatique rapide est utilisé pour le transfert des échantillons de la salle de stockage (2.9) vers le canal H9 situé dans la cage central. Cette voie d'irradiation convient très bien pour l'exploitation des réactions à seuil avec les neutrons rapides FNAA¹³ ou les réactions de capture radiative avec les neutrons thermiques ENAA¹⁴ . Les niveaux de flux des neutrons rapides et épithermiques y sont relativement élevés comparativement aux sites situés à la périphérie du cœur.

¹³ Fast Neutron Activation Analysis.

¹⁴ Epithermal Neutron Activation Analysis.

2. Le système de convoyage pneumatique rapide est utilisé pour le transfert des échantillons de la salle de stockage (2.10) vers la colonne thermique. Ce site situé à la périphérie du cœur présente un rapport flux thermique sur flux rapide très élevé minimisant ainsi les réactions d'interférences dues aux neutrons rapides.

L'acquisition des données d'irradiation est faite par spectrométrie gamma.

IV- 1- 3- 2- La chaîne de spectrométrie gamma

La chaîne de spectrométrie gamma située à proximité du dispositif de réception des capsules irradiées est composée de plusieurs modules électroniques :

- *Source de refroidissement du cristal* : l'azote liquide.
- *Le détecteur* : cristal de type HP Ge (Germanium de haute pureté).
- *Le préamplificateur* : placé à proximité du cristal, son rôle c'est de fournir une impulsion de tension qui peut être traité par l'amplificateur à partir des charges collectées sur les électrodes du détecteur
- *La haute tension* : environ 2000V, son rôle c'est de polariser le SC³ afin d'obtenir une zone désertée importante dans le cristal HP Ge.
- *L'amplificateur* : améliore la précision de mesure en portant le signal au niveau requis par l'échelle d'entrée de l'élément final de la chaîne.
- *Le convertisseur analogique digital (numérique) ADC* : reçoit à son entrée une tension analogique V_i , et délivre à la sortie un signal numérique correspondant, selon un code binaire déterminé à la valeur numérique N associée à V_i .
- *L'analyseur multicanal MCA* : sélectionner les impulsions suivant leurs amplitudes

IV- 2- Méthodes

Etudes des TSP et des ETM associés

IV- 2- 1- Echantillonnage

Nous avons fixé le débit de prélèvement de l'air à $01\text{m}^3/\text{h}$, l'équivalent de la respiration humaine, pour pouvoir évaluer le risque de l'exposition des personnes à cette pollution vu que notre site d'étude s'agit d'un site urbain. Nous avons effectué un prélèvement chaque les 48 heures et parfois chaque 72 heures, durant la période du prélèvement, nous avons mentionné toute remarque pouvant influencer sur les résultats (pluie, neige, vent violent...), afin de donner une bonne interprétation.

La collecte des aérosols a été faite sur des filtres membranaires (en nitrate de cellulose) ouverts sans coupure granulométrique précise et de porosité de $0,8\mu\text{m}$ (type AA) dotés d'un diamètre de 37 mm. Ces filtres répondaient à tous les exigences requises (voir chapitre I-4-2).

IV- 2- 2- Etude des TSP

Nous avons pesé le filtre neuf (avant prélèvement) qui va être placé dans le dispositif d'échantillonnage, après l'étape de l'échantillonnage, nous avons noté le volume d'air aspiré puis nous avons pesé le filtre récupéré de l'échantillonneur avec une balance analytique de précision de 0,1mg.

La concentration des TSP dans l'air est calculée par l'équation suivant :

$$TSP(\mu\text{g} / \text{m}^3) = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 10^3 \quad (\text{IV-1})$$

TSP : Concentration des particules totales en suspension dans l'air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

m_1 : Masse du filtre avant prélèvement (mg).

m_2 : Masse du filtre après prélèvement (mg).

V : Volume d'air aspiré.

Pour pouvoir appliquer cette relation et dire que les particules retenues dans le filtre pendant l'aspiration ne sont à l'origine qu'à cette dernière et non pas au vent infiltré dans le système de prélèvement, nous avons simulé le fonctionnement de notre échantillonneur en lui imposant une contrainte de vent égale à 60m/s dans les trois directions (x,y,z), Cette simulation a été faite avec le logiciel professionnel SolidWorks 2010–Flow Simulation (programme de simulation mécanique du CAO 3D, conception assistée par ordinateur, que développé par Dassault Systèmes SolidWorks Corp., une filiale de Dassault Systèmes, S. A. (Vélizy, France). SolidWorks est actuellement utilisé par plus de 2 millions d'ingénieurs et recommandé par plus de 165.000 compagnies dans le monde entier. Le revenu FY2011 pour SolidWorks était de 483 millions de dollars), la figure IV-3 résume le résultat de la simulation de la circulation d'air au niveau de site de prélèvement.

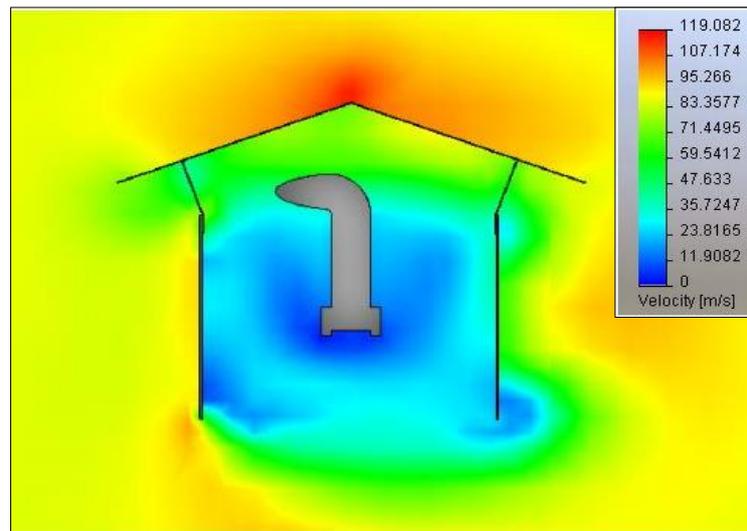


Figure IV-3: Simulation de la circulation d'air au niveau de site de prélèvement.

On remarque que la vitesse de pénétration du vent jusqu'au filtre est égale à **zéro**, donc les particules retenues ne sont à l'origine que de l'aspiration.

IV- 2- 3- Etude des ETM associés aux TSP

Nous avons opté pour l'analyse de nos échantillons (filtres) la méthode d'analyse par activation neutronique en se basant sur les nombreux avantages offert par cette technique d'analyse (hautement sensible, la non destruction de l'échantillon, multi-élémentaire...). L'utilisation de la méthode absolue n'était pas pratique à cause de l'imprécision de la connaissance de la fluctuation du flux neutronique Φ dans l'espace et dans le temps, nous avons utilisée la méthode relative (Chapitre II-5-2) dont le principe de quantification des éléments retenus dans les filtres repose sur des standards qui servent comme références pour le calcul des concentrations en polluants dans les échantillons, l'emploi de plusieurs standards dans une telle expérience est très utile pour pouvoir confirmer la concentration d'un élément par rapport à plusieurs références, les trois standards utilisés sont :

1. GSV4 : feuilles de thé chinois.
2. Soil7 : sol.
3. NIST : sol.

La mise en pratique de cette technique d'analyse s'est déroulée au niveau des canaux d'irradiation du réacteur nucléaire NUR de Drarïa.

IV- 2- 3- 1- Conditionnement des échantillons pour l'AAN

Nous avons visé l'analyse qualitative et quantitative des ETM de moyenne et de longue période, le conditionnement des échantillons est une étape nécessaire avant l'irradiation des échantillons, le conditionnement se fait dans des enveloppes en aluminium de haute pureté nucléaire (99,99%) [44].

Cette étape s'est déroulée comme suit :

- Nous avons pesé le filtre après prélèvement et la quantité du standard utilisée avec une balance analytique dotée d'une précision de 0,1mg.
- Les filtres sont coupés en deux morceaux égaux, une partie destinée à l'irradiation et l'autre partie à conserver (une étude antérieure à montrer que la répartition des ETM sur le filtre est homogène).
- Des rectangles de dimensions 3x2,5cm d'aluminium de haute pureté nucléaire ont été découpés, nettoyés plusieurs fois avec de l'acétone, laissés à sécher et mises sous forme d'enveloppes puis encodées par le même code que celui de l'échantillon.
- Chaque enveloppe est pesée à vide, puis la moitié du filtre a été chargée dans cette dernière.
- Chaque standard est chargé dans une autre enveloppe.
- Une fiche de pesée est établie.

IV- 2- 3- 2- L'irradiation

Les enveloppes d'aluminium de haute pureté contenant les échantillons et les standards ont été rassemblés dans des capsules destinées à l'irradiation (Figure IV-4). Chaque capsule relative à une expérience identifiée par le laboratoire contenait entre 18 et 20 échantillons.

Le temps d'irradiation dans le cœur du réacteur nucléaire NUR était de 06 heures.

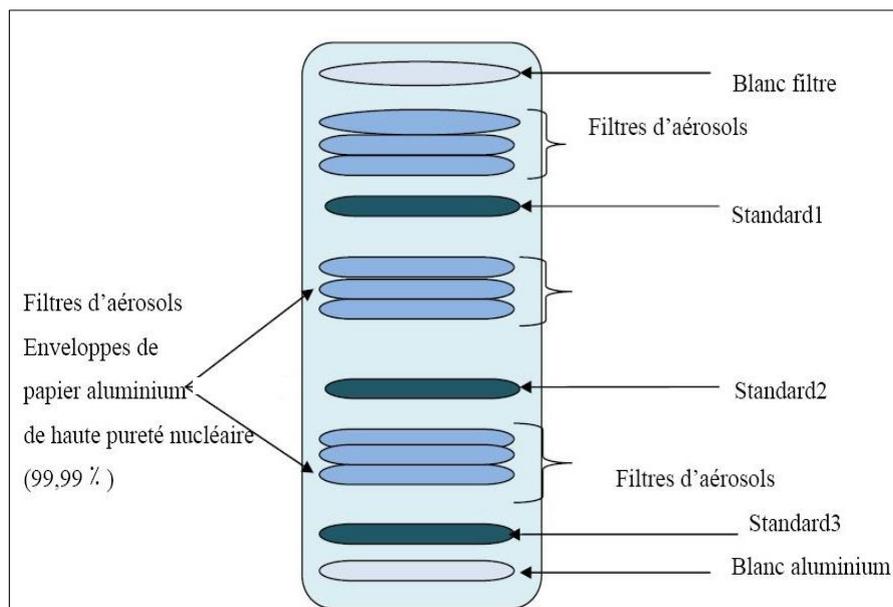


Figure IV-4: Schéma de conditionnement des échantillons dans la capsule destinée à l'irradiation.

IV- 2- 3- 3- Décroissance radioactive des échantillons irradiés

A la fin de l'irradiation, les capsules sont radioactives, les radioprotectionnistes examinent le taux de la radioactivité émise par chaque capsule pour juger si la capsule est manipulable ou pas, deux conditions primordiales sont à respecter :

- Avoir une activité suffisante pour la mesure.
- Assurer la radioprotection du personnel manipulateur.

Le temps de la décroissance radioactive des éléments de moyenne période a été de 4 jours et de 30 jours pour les éléments de longue période.

IV- 2- 3- 4- Etalonnage de la chaîne de spectrométrie gamma

A la fin de l'irradiation, si les capsules sont manipulables, elles sont renvoyées vers la cellule « Spectrometrie » pour l'analyse des émissions gamma en utilisant la spectroscopie gamma.

Une bonne mesure spectroscopique dépend de la calibration de la chaîne de mesure qui se déroule comme suit :

- L'étalonnage de l'amplificateur en utilisant une source de cobalt-60 nécessaire pour l'analyse du spectre.
- L'étalonnage en énergie : l'analyse du spectre nécessite l'alignement respectif des raies de la source d'étalonnage qui émet des photons gamma d'énergies connues aux canaux correspondants. Nous avons utilisé comme source de calibration la source d'Eu-152 qui couvre toute la gamme d'énergie qui nous intéresse [0 , 2000KeV].
- L'étalonnage en efficacité : Pour une chaîne de spectroscopie, la connaissance de l'efficacité permet de retrouver l'activité d'une source radioactive ou, dans le cas de l'analyse par activation neutronique par voie absolue, de déterminer la concentration d'un élément dans l'échantillon ; en effet, lorsqu'il n'est pas possible d'appliquer la procédure relative en raison de l'absence du standard adapté au spécimen à doser, on applique la voie absolue qui nécessite la détermination de l'expression de l'efficacité. Elle est aussi utilisée pour établir des prévisions de comptage et déterminer les conditions de l'expérience telle que la durée d'irradiation, le niveau de flux et la durée de décroissance.

IV- 2- 3- 5- Acquisition des données d'irradiation

L'efficacité de la chaîne de détection est fonction de l'énergie du photon gamma (γ) et de la distance source-détecteur (géométrie) (Figure IV-5).

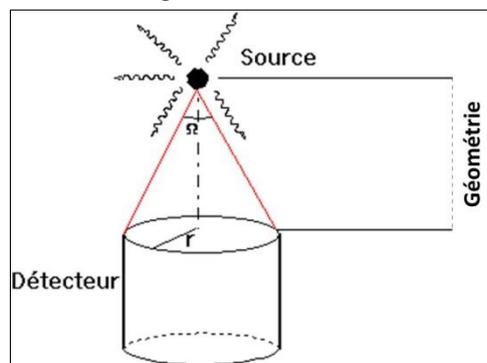


Figure IV-5: Schéma de la géométrie (source-détecteur).

Les spectres, résultants de l'analyse (voir annexe 1), fournissent des données concernant :

- Les taux de comptage, appelé *NET*, qui représentent la surface des pics de l'élément détecté.
- Les énergies des pics émis.
- Les temps de décroissances radioactives.

IV- 2- 3- 6- Analyse qualitative des ETM

A l'aide des abaques (voir annexe 5) qui associent chaque énergie à un radio-isotope, nous avons traduit ainsi nos spectres. Dans plusieurs cas, des problèmes d'identification et d'interprétation des résultats bruts peuvent être posés, citons à titre d'exemple le phénomène d'interférences : nous nous retrouvons face à ce problème d'interprétation quand deux éléments différents émettent des photons gamma de même énergie [46].

Exemple : l'interférence entre le Sélénium et le Mercure, émettent tout les deux des photons gamma d'une énergie de 279 KeV.

IV- 2- 3- 7- Analyse quantitative des ETM

Une fois un élément déterminé, son *NET* et son temps de décroissance radioactive sont utilisés pour le calcul de sa concentration.

Pour le calcul, l'équation (II-16) de la méthode relative est adaptée comme suit :

$$C_e (ng / m^3) = C_s \cdot m_s \cdot \frac{NET_e \cdot e^{\lambda \cdot t_{de}}}{NET_s \cdot e^{\lambda \cdot t_{ds}}} \cdot \frac{2}{V}$$

C_e : Concentration de l'élément dans l'échantillon (ng/m^3).

C_s : Concentration de l'élément dans le standard ($\mu g/g$ de standard).

m_s : Masse du standard (mg).

NET_e : Net de l'élément dans l'échantillon.

NET_s : Net de l'élément dans le standard.

t_{de} : Temps de décroissance de l'élément dans l'échantillon (s).

t_{ds} : Temps de décroissance de l'élément dans le standard (s).

V : Volume d'air aspiré (m^3).

Facteur 2 : Car nous avons analysé que la moitié du filtre.

IV- 2- 4- Calcul d'erreurs

IV- 2- 4- 1- Equation d'erreurs sur les TSP

Lors de la détermination des teneurs en TSP, l'erreur relative à cette détermination est liée aux matériels utilisés et au manipulateur, nous avons utilisé une balance analytique de précision de 0,1mg et un volumètre.

En se référant à l'équation (IV-1), l'erreur sera calculée comme suit :

$$\Delta TSP(\mu\text{g} / \text{m}^3) = TSP \cdot (0,1 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}})$$

TSP : Concentration des TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Facteur 0,1 : Erreur systématique de la balance (mg)

Facteur $\sqrt{\frac{2}{3}}$: Variance sur l'erreur de la balance (marge de confiance de 95%).

IV- 2- 4- 2- Equation d'erreurs sur les ETM

La détermination des teneurs en ETM dans nos échantillons s'est basée sur l'équation de la méthode relative, l'erreur sur cette quantification est liée aux instrumentations (balance, chaîne de spectroscopie gamma,...), la relation de calcul d'erreur sur les ETM est donnée par la relation suivante :

$$\Delta C_e = C_e \sqrt{\left(\frac{\Delta C_s}{C_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta NET_e}{NET_e}\right)^2 + \left(\frac{\Delta NET_s}{NET_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_s}{m_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_e}{m_e}\right)^2} \quad (\text{IV-2})$$

ΔC_e : Erreur sur concentration de l'élément dans l'échantillon ($\mu\text{g}/\text{g}$ d'échantillon).

ΔC_s : Erreur sur concentration de l'élément dans le standard ($\mu\text{g}/\text{g}$ de standard).

$\frac{\Delta m_s}{m_s}$: Rapport : erreur sur la pesé du standard sur la masse du standard.

$\frac{\Delta m_e}{m_e}$: Rapport : erreur sur la pesé de l'échantillon sur la masse de l'échantillon.

$\frac{\Delta NET_s}{NET_s}$: Rapport : erreur sur le NET du standard sur le NET du standard.

$\frac{\Delta NET_e}{NET_e}$: Rapport : erreur sur le NET de l'échantillon sur le NET de l'échantillon.

Modélisation des TSP et des ETM associés

IV- 2- 5- La chronologie des observations

Dans notre présente étude, nous avons quantifié la pollution atmosphérique en TSP et en ETM au niveau de Drarïa du 18/04/2011 au 08/01/2012. Nous avons procédé à la modélisation de cette pollution à partir des données acquises de toute l'année 2011, la quantification de la pollution atmosphérique durant la période du 13/12/2010 au 16/04/2011 a été faite dans une étude antérieure au même site de prélèvement et dans les mêmes conditions d'échantillonnage et d'analyse.

A partir des données acquises de l'étude de la pollution atmosphérique au niveau de notre zone d'étude (Drarïa), nous avons remarqué qu'en plus des TSP il y a seulement dix (10) éléments traces métalliques qui peuvent être modélisés vu qu'ils présentent un nombre d'observations important d'observations (il y a peu d'indétermination).

Puisque l'indétermination d'un élément n'implique pas son inexistence, donc la détermination de ces indéterminations est une opération nécessaire pour avoir la chronologie en observations de chaque élément à modéliser. Comme nous avons effectué un prélèvement chaque deux à trois jours (parfois plus quand ça coïncide avec un week-end), la détermination des observations intermédiaires (entre chaque deux prélèvements successives) est aussi nécessaire pour avoir la chronologie *continue* des observations, pour ce faire nous avons utilisé les réseaux de neurones vu leur puissance et leur traitement des phénomènes en tant que système numérique de type entrées-sorties. (Nous expliquant en détail la mise en pratique des réseaux de neurones dans ce même chapitre dans le paragraphe IV-2-7-3).

En premier lieu, nous avons converti les dates de prélèvements en jours afin de créer une chronologie, en suite nous avons élaboré un réseau de neurones dont l'entrée correspond aux jours de prélèvement et la sortie à la concentration de l'élément ciblé. Nous avons retiré 20 % de l'échantillon de base qui servira pour la phase du test de validation et le reste 80% pour la phase de l'apprentissage. Pour pouvoir utiliser le résultat fournit par le réseau de neurones, nous avons testé plusieurs architectures afin d'avoir une correspondance $\geq 99,5\%$ entre les valeurs réelles et les valeurs simulées. Après la validation du réseau de neurones, nous avons simulé par ce dernier les concentrations aux jours manquants.

Le résultat est une série chronologique *continue* composée de **386 jours** (observations).

IV- 2- 6- Identification des entrées des modèles

Comme nous avons vu dans le chapitre III-2, l'ACP a pour objectif de chercher les relations entre individus (entrées) par l'évaluation de leurs ressemblances, ainsi que les relations entre variables par l'évaluation de leurs liaisons. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons cherché la liaison existante entre l'historique de l'observation à modéliser, le volume aspiré et les TSP.

L'ACP a révélé l'existence d'une *forte liaison* entre l'observation du jour J et $J-1$, la représentation graphique des deux composantes principales issues de l'ACP de chaque observation à modéliser a montrée qu'il y a deux nuages : le premier nuage regroupe

l'observation du jour J et $J-1$, le deuxième nuage regroupe les observations des $J-i$ ($i=2,3,4$), les TSP ne contribuent pas dans l'explication du phénomène.

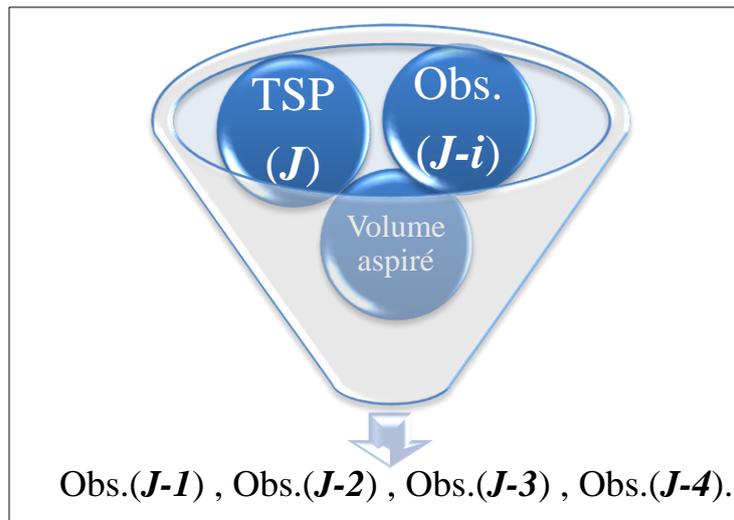


Figure IV-6: Illustration du résultat fourni par l'ACP.

Nous avons remarqué qu'il existe une forte corrélation entre l'ensemble des observations au jour J relatives à l'élément à modéliser et les observations des jours $J-i$ ($i=1,2,3,4$), c'est-à-dire que *la concentration d'un élément au jour J dépend de sa concentration au jour $J-1, J-2, J-3$ et $J-4$* . Nous avons utilisé le logiciel IBM-SPSS Statistique v19 pour le calcul des ACP.

IV- 2- 7- Création des modèles

L'objectif de cette étude est de tester trois méthodes différentes de modélisation afin de prédire avec quasi exactitude les concentrations en TSP et en ETM associés dans le futur proche. En effet, on a opté pour le lissage exponentiel double, le modèle ARMA et les réseaux de neurones. Pour pouvoir décider quelle est la meilleure méthode, une comparaison entre les résultats fournis par chacun de ces derniers est nécessaire.

Selon l'objectif fixé au départ, une combinaison entre ces différentes méthodes de modélisation a fait suite pour la prévision des TSP et des ETM associés.

IV- 2- 7- 1- Modélisation par LED

Comme nous avons vu dans le chapitre III-5-3, la modélisation par lissage exponentiel simple est moins précise que le lissage exponentiel double, c'est pour cette raison que nous avons choisi de modéliser par la méthode LED en se basant sur les équations décrivant cette méthode, et qui forment une méthode de n itérations (n étant le nombre d'observations relative à l'élément à modéliser).

Le principe et l'application de cette méthode revient à choisir la valeur de ω (constante de lissage), plusieurs méthodes sont proposées, la valeur optimale du coefficient de lissage, à un instant donné, résulte d'un compromis entre l'inertie liée à l'intégration des données lointaines et la sensibilité aux valeurs récentes.

En cas d'erreur de prévision constatée, deux interprétations sont possibles [42]:

- Il s'agit d'un accident, le coefficient doit alors être diminué afin de gommer l'effet de cette valeur anormale pour le calcul des prochaines prévisions.
- Il s'agit d'une rupture de tendance durable, le coefficient doit être augmenté afin d'intégrer le plus rapidement cette nouvelle tendance pour le calcul de la prévision.

L'approche de détermination de ω la plus couramment employée est la suivante [42]:

La valeur du coefficient de lissage est celle qui minimise la somme des carrés des erreurs de

$$\text{prévision passée : Min } \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 .$$

Le principe de la mise en pratique est simple : pour l'intervalle donné $[0, 1]$ des valeurs de ω , les prévisions sont simulées avec un *pas* assez fin (0,01 par exemple). Nous retenons la valeur de ω qui rend minimum la somme des carrés des écarts de prévision.

Puisqu'elle s'agit d'une méthode itérative contenant plusieurs étapes de calcul et pour pouvoir mettre en pratique les équations de la méthode LED, nous avons traduit ces opérations en langage Matlab v7.5 (2010) (Langage de calcul numérique environnement et langage de programmation de quatrième génération. Développé par The MathWorks, MATLAB permet la manipulation des matrices, le traçage des fonctions et des données, la mise en œuvre des algorithmes, la création des interfaces utilisateur et l'interface avec les programmes écrits dans d'autres langues, y compris C, C++, Java et Fortran. En 2004, MATLAB comptait environ un million d'utilisateurs dans l'industrie et le milieu universitaire. Les utilisateurs de MATLAB sont issus de divers milieux de l'ingénierie, la science et l'économie. MATLAB est largement utilisé dans les institutions universitaires et de recherche ainsi que des entreprises industrielles.). Voir annexe 2 pour l'organigramme de l'algorithme correspondant.

IV- 2- 7- 2- Modélisation par le modèle ARMA

La modélisation par le modèle ARMA revient à déterminer le retard des observations à modéliser, c'est-à-dire, est ce que l'observation du jour J dépend seulement de l'observation de $j-1$ ou de $j-1$ et de $j-2$ ou bien de $j-1$, $j-2$ et de $j-3$?

L'autocorrélation a pour but de répondre à cette question et de déterminer cette dépendance, on appelle coefficient d'autocorrélation la valeur calculée entre la série chronologique et cette même série décalée pour des ordres allant de 0 à k (où k étant le nombre de jours décallés). Ce coefficient est donné par :

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (y_t - \bar{y}_1) \cdot (y_{t-k} - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_{t=k+1}^n (y_t - \bar{y}_1)^2 \cdot \sum_{t=k+1}^n (y_{t-k} - \bar{y}_2)^2}}$$

La représentation graphique de la fonction d'autocorrélation est appelée corrélogramme, les coefficients d'autocorrélation ainsi que les corrélogrammes relatifs à chaque élément que à modéliser ont été calculé par le logiciel EViews v3.1 (économétries Vues est un logiciel de statistiques, utilisé principalement pour les séries chronologiques orienté. Il est développé par Micro Software (SMQ), La version actuelle est de 8, sorti en Mars 2013). La figure IV-7 montre le principe d'interprétation d'une autocorrélation.

Dans cet exemple, pour chercher le retard de la série chronologique d'observations ci-contre, nous avons fixé la valeur de k à 30, nous remarquons qu'il y a une forte autocorrélation entre la série chronologique et les retards 1, 2, 3, 4 et 5 d'une part et une corrélation partielle nulle avec le retard 5 d'autre part.

Les retards de cette série chronologique d'observations sont 1, 2, 3 et 4 et ils sont notés respectivement : AR(1), AR(2), AR(3) et AR(4).

Après avoir identifié l'ordre du processus ARMA, il convient d'estimer les paramètres du modèle, puis de vérifier à partir d'un certain nombre de tests statistiques que l'estimation du modèle est valide. Les conditions étant réunies, nous pouvons alors utiliser le modèle à des fins de prévision. L'algorithme de *Box et Jenkins* systématise cette démarche [41]. Nous avons utilisé le logiciel EViews v3.1 pour la détermination des paramètres et la validation du modèle.

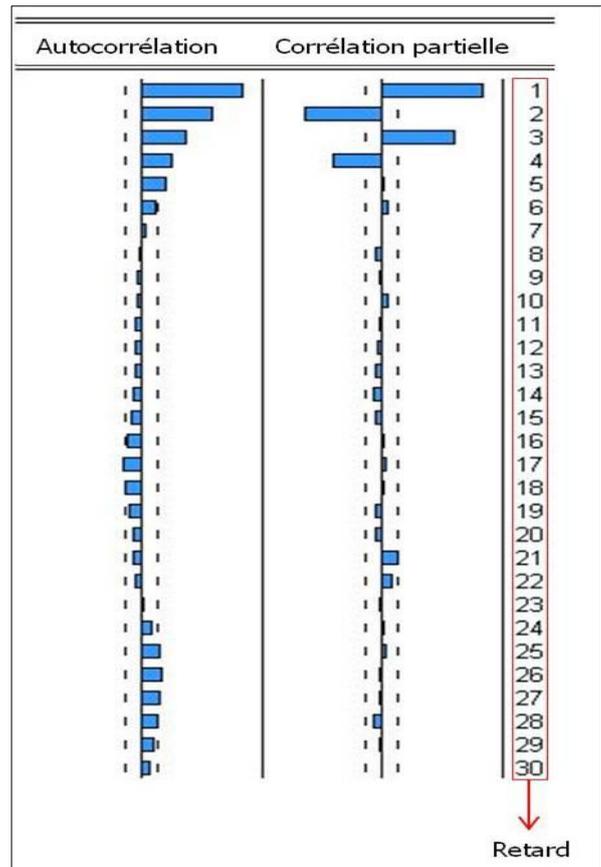


Figure IV-7: Exemple d'un Corrélogramme.

IV- 2- 7- 3- Modélisation par les réseaux de neurones

Comme nous avons vu dans le chapitre III-3, pour réaliser un modèle de réseaux de neurones, trois étapes successives sont nécessaires :

1. *L'architecture du réseau* où le nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans chacune de ces couches (Figure IV-8). Le réseau ne doit être ni trop souple, ni trop rigide.
1. *Les poids des connexions* sont calculés en minimisant l'erreur d'approximation sur les données de l'ensemble d'apprentissage, de telle manière que le réseau réalise la tâche désirée.
2. *La qualité du réseau obtenu* est estimée à partir d'exemples ne faisant pas partie de l'ensemble d'apprentissage.

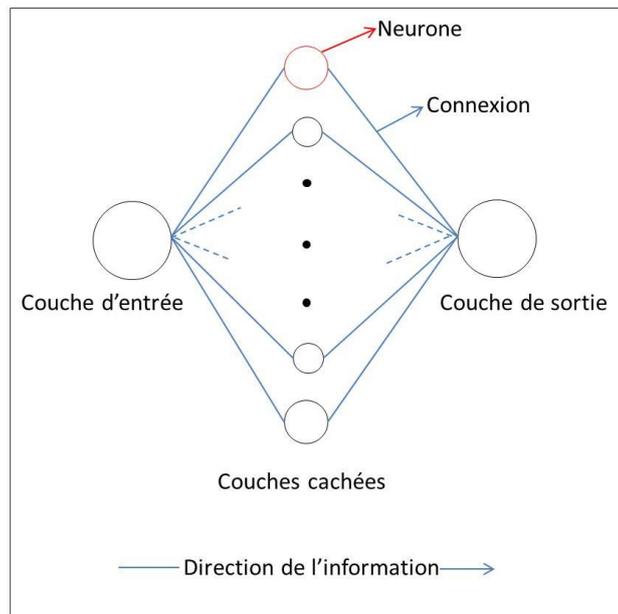


Figure IV-8: Représentation schématique de l'architecture d'un RN.

Le modèle des réseaux de neurones optés dans ce mémoire est le perceptron multicouche à sens unique (*feedforward* en anglais). Nos essais et nos tests consistaient à élaborer plusieurs modèles de réseaux de neurones, ceci en modifiant le nombre de couches, le nombre de neurones dans chaque couche ainsi que les fonctions de transfert car dans la bibliographie, aucune étude n'a été réalisée pour répondre à cette problématique. Cette démarche a été adoptée pour les TSP comme pour les ETM associés à ces TSP.

Ainsi, notre choix s'est limité pour des modèles ayant une fonction transfert de type sigmoïde (tangent sigmoïde ou logarithme sigmoïde) dans la couche cachée, et de type linéaire dans la couche de sortie. Des travaux précédents ont montré que ce couple de fonctions permet d'approximer quasiment tous les types de relations non linéaires [43].

Vu la différence de grandeur en terme de concentration, nos réseaux de neurones ont pris plusieurs architectures différentes tout dépend de l'élément à modéliser. L'établissement de l'architecture convenable pour chaque élément à modéliser a été une étape cruciale qu'a nécessité l'exécution du programme (voir annexe 3) plusieurs fois (20 à 30 fois) afin d'obtenir la meilleure validation du modèle (chapitre IV-2-10).

Notre objectif est de construire un réseau de neurones capable d'apprendre les données qu'on lui propose, mais aussi qui offre une bonne généralisation à des fins de prédiction, en d'autres termes qui évite le sur-ajustement lors de l'apprentissage. Pour ce faire, nous retirons 20 % d'observations de base qui serviront de test de validation et le reste (80%) pour l'apprentissage.

L'apprentissage des données est un apprentissage supervisé par l'algorithme de rétro propagation de l'erreur (*backpropagation* en anglais), l'erreur étant estimée par la moyenne des carrés d'erreurs (*MSE Mean Squared Error* en anglais) dont la relation est donnée par :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2$$

L'apprentissage est réalisé par l'algorithme de Levenberg-Marquardt qui donne de meilleurs résultats que les algorithmes usuels à pas constant. Pour rendre notre réseau plus souple et moins rigide, nous avons utilisé une méthode basée sur la technique de *régularisation bayésienne* par modération des poids qui consiste à pénaliser les valeurs élevées des poids en modifiant la fonction de coût [43]. Cette technique force les paramètres (les poids) à ne pas prendre des valeurs trop élevées et par conséquent, à éviter le sur-ajustement.

Le choix des entrées du réseau de neurone a été basé sur le résultat commun fournit par l'ACP et l'autocorrélation, c'est-à-dire, les rentrées du réseau sont les observations historiques au $J-1$, $J-2$, $J-3$ et $J-4$ de chaque élément à modéliser et la sortie étant la concentration de l'élément au jour J . La mise en pratique d'une modélisation par les réseaux de neurones en tenant compte de tous les critères et les paramètres cités supra a été programmée par le logiciel MATLAB v7.5 (2010), l'organigramme de l'algorithme est illustré dans l'annexe 3.

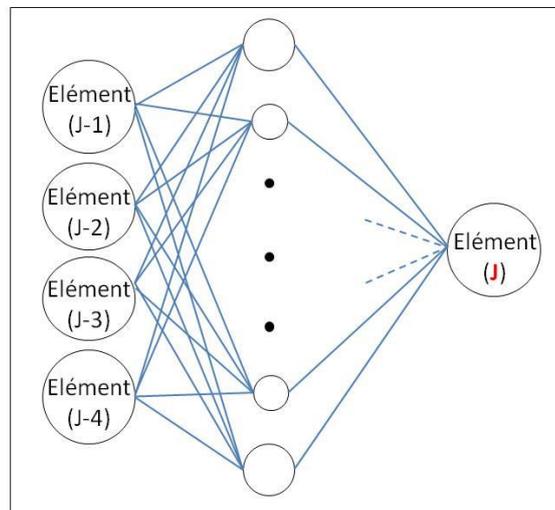


Figure IV- 9: Schématisation de l'architecture de la modélisation par réseau de neurones.

IV- 2- 8- Calcul d'erreur sur les modèles

L'objectif de la modélisation est de représenter virtuellement des phénomènes réels à partir d'algorithmes et de modèles mathématiques, puisque la modélisation n'est qu'une traduction de la réalité par les divers outils mathématiques, le modèle mis en pratique admet forcément une erreur entre l'observation réelle et la prédiction, cette erreur est relative à la performance du modèle établi. Cette erreur doit être déterminée pour pouvoir valider le modèle.

Après avoir créé un modèle à chaque élément (TSP ou ETM), nous avons procédé à la détermination de l'erreur relative à chaque modèle, cette détermination était comme suit :

L'erreur maximale admissible est de $\pm 10\%$ de la valeur réelle (valeur observée), nous avons calculé pour chaque temps t l'éloignement de la valeur modélisée notée « y^* » par rapport à la valeur réelle observée notée « y », deux cas se présentent :

1. y^* est **hors** la marge d'erreur, c'est-à-dire $+10\%$ de $y < y^* < -10\%$ de y .
2. y^* est **dans** la marge d'erreur, c'est-à-dire -10% de $y \leq y^* \leq +10\%$ de y .

L'erreur sera définie par la relation :

$$\text{Erreur}(\%) = \tilde{y}^* = \frac{100 \cdot y^*}{y} \quad (\text{IV-3})$$

Nous illustrons dans la figure IV-10 le principe de calcul.

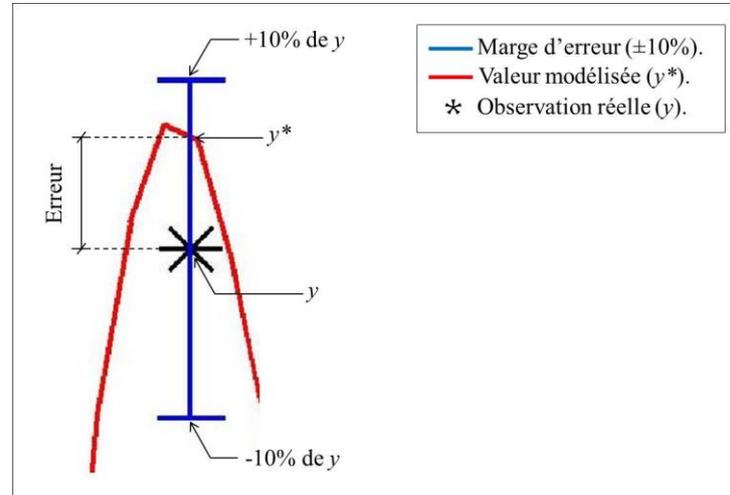


Figure IV- 10: Principe de calcul d'erreurs sur les modèles.

IV- 2- 9- Critères de validation d'un modèle

IV- 2- 9- 1- Coefficient de détermination

Lors de l'établissement d'une équation de régression, le coefficient de régression ou de détermination « R^2 » détermine à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points [28].

Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0% de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des points.

Si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100% de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres du modèle calculé sont ceux qui déterminent la distribution des points.

Cela se traduit : plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points est diffus autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se rapproche de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, $R^2=1$.

Le R^2 est calculé par la formule suivante [27] :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

IV- 2- 9- 2- Valeurs comprises dans la marge d'erreur

Le pourcentage des valeurs comprises dans la marge d'erreur ou VCDME est un critère de validation d'un modèle qui traduit le nombre de valeur de y^* comprises dans la marge d'erreur notées « \tilde{y}^* » par rapport à la totalité des y^* .

Dans ce présent mémoire, comme nous l'avons illustré dans le paragraphe IV-2-5, nous disposons de 386 valeurs modélisées, donc le VCDME est calculé comme suit :

$$VCDME = \frac{100 \cdot \tilde{y}^*}{386}$$

IV- 2- 10- Critères de comparaison

Après avoir déterminé et validé la modélisation de chaque élément par les trois méthodes (LED, ARMA, RN), le choix de la méthode qui explique mieux l'élément en terme de qualité de modélisation s'est basé sur les critères de comparaison entre les modèles obtenues par chaque méthodes. Ces critères sont :

- Le coefficient de détermination (R^2).
- Le VCDME.

IV- 2- 11- La Prévision des TSP

La modélisation permet de refaire virtuellement et de tester différents scénarios d'un phénomène en modifiant toutes les données opératoires et géométriques [20].

Les quatre éléments caractéristiques de la prévision sont :

1. La variable à prévoir et les variables explicatives (c'est-à-dire l'ensemble des données disponibles).
2. L'horizon de prévision.
3. Les méthodes de calcul ou d'estimation.
4. L'objectif de la prévision.
5. La forme des résultats désirés (valeurs numériques, graphiques, ou distribution de probabilités).

Après avoir élaboré et valider la modélisation des TSP, nous avons procédé à la prévision de ces derniers, l'intérêt pratique de cette prévision c'est d'estimer la pollution *quotidienne* en TSP au niveau de notre site d'étude (Drarīa) en effectuant que deux prélèvements par semaine.

Pour ce faire, les quatre éléments caractéristiques de cette prévision sont :

1. *La variable à prévoir* : TSP.
Les variables explicatives : Historiques des TSP noté $TSP_{j,i}$.
2. *L'horizon de prévision* : Quatre jours.
3. *Les méthodes de calcul* : Réseau de neurones.
4. *L'objectif de la prévision* : Quantification quotidienne des TSP.
5. *Le type de résultat désiré* : Valeurs numériques.

Dans le but d'avoir la meilleure qualité de prévision, nous avons testé deux méthodes différentes basées sur les réseaux de neurones : méthode de bloc (un seul réseau qui a pour entrées les TSP

au jours $J-i$ ($i=1,2,3,4$) et les TSP_{J+k} ($k=1,2,3,4$) à la sortie) et méthode itérative. Nous avons remarqué qu'il y a une divergence sur la précision au delà $J+4$, c'est pour cette raison que notre horizon de prévision était de quatre jours et que la valeur maximale de k égale à 04.

La méthode itérative (Figure IV-11) a été la plus performante en terme de qualité de précision sur la prévision, le principe de la méthode est le suivant :

- *La première itération* : les entrées sont TSP_{J-i} ($i=1,2,3,4$), la sortie c'est TSP_J .
- Les quatre prochaines itérations utilisent la sortie des prévisions précédentes et TSP_{J-i} ($i=1,2,3,4$) pour composer l'entrée l'itération en cours, la sortie c'est TSP_{J+k} ($k=1,2,3,4$).
Exemple : *La deuxième itération* : les entrées sont les TSP_{J-i} ($i=1,2,3,4$) et TSP_J , la sortie c'est TSP_{J+1} .

L'optimisation de l'architecture du réseau de neurones qui fournira la meilleure qualité sur les prévisions a nécessité la proposition de diverses architectures, nous avons utilisé un programme en langage Matlab v7.5 (2010) pour mettre en pratique cette méthode. L'organigramme de l'algorithme est présenté dans l'annexe 4

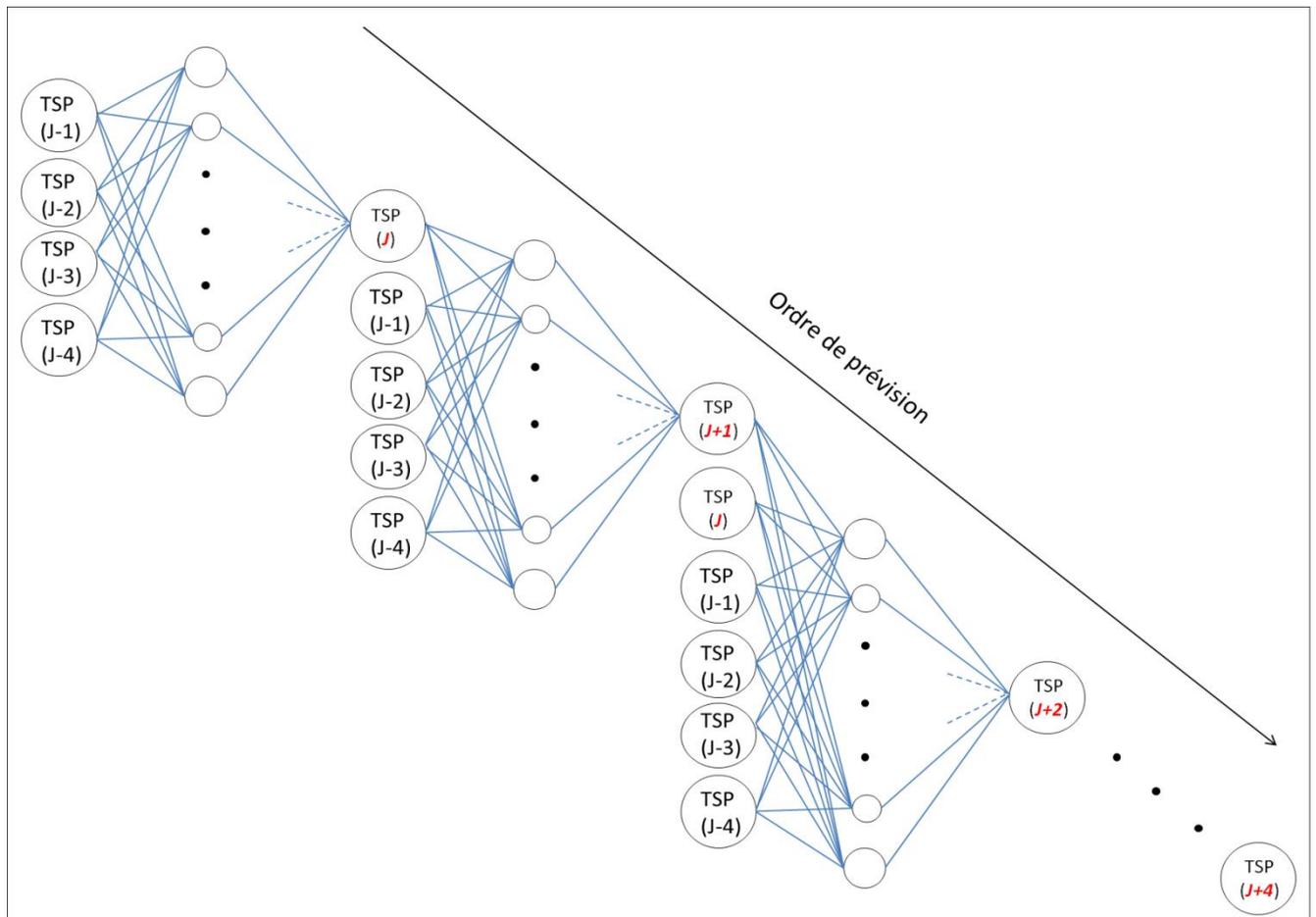


Figure IV-11: Schéma de la méthode itérative des réseaux de neurones.

IV- 2- 12- Prévision des ETM associés aux TSP

Comme nous avons vu dans les paragraphes précédents, la modélisation des ETM associés aux TSP a été basée sur l'historique des observations de l'élément (observations des $J-i$ ($i=1,2,3,4$)), en pratique, pour avoir une de ces observations nous avons besoin d'un temps entre 30 et 40 jours (échantillonnage, conditionnement, irradiation, décroissance radioactive, comptage et interprétation), cette problématique nous a poussé à poser la question :

« **Comment quantifier les ETM sans les analyser tout en exploitant nos modèles ?** ».

Puisque nous cherchons à quantifier les ETM associés aux TSP, en première étape, nous avons entraîné un réseau de neurone qui détermine la concentration d'un ETM déjà modélisé au jour J à partir de l'historique des TSP aux jours $J-i$ ($i=1,2,3,4$) (Figure IV-12).

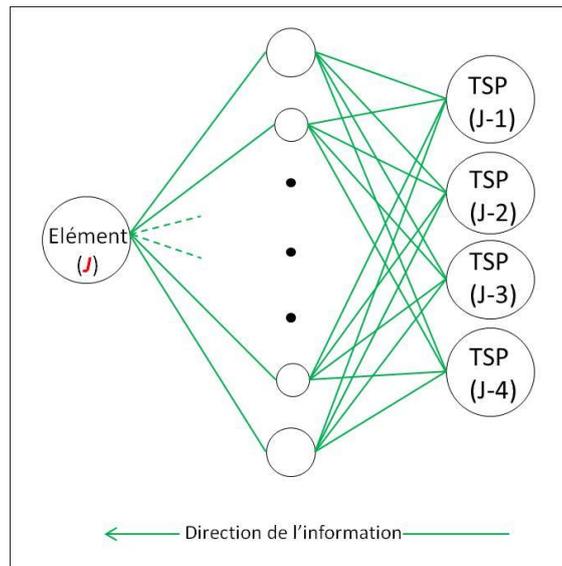


Figure IV-12: Schéma du réseau de neurones déterminant les ETM_J à partir des TSP_{J-i} .

En deuxième étape, pour prévoir les ETM, nous avons combiné ce réseau avec le réseau de neurones de prévision des TSP, cette combinaison est illustrée dans la figure IV-13.

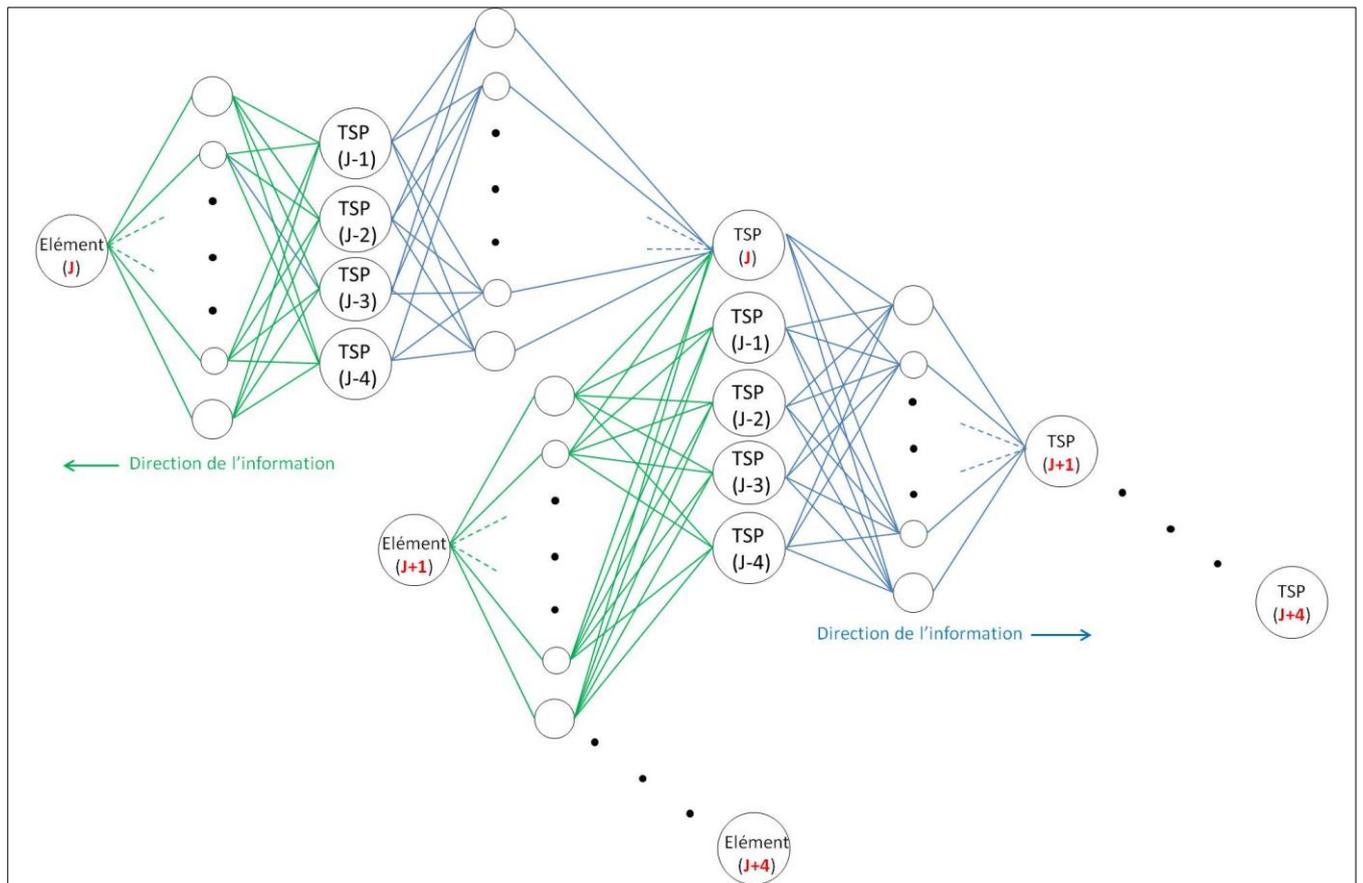


Figure IV-13: Schématisation de la combinaison entre le RN de la prévision des TSP et le RN de détermination des ETM.

IV- 2- 13- Vérification de la fiabilité et exploitation des modèles

Pour tester la fiabilité des méthodes utilisées ainsi que les modèles et les réseaux de neurones construits, nous avons procédé à la validation de ces derniers en les appliquant sur l'année 2012 et sur une période de 112 jours du 10/01/2012 au 02/05/2012 (environ quatre mois). La comparaison entre les résultats fournis par nos modèles et la réalité s'est basée sur l'analyse réelle des TSP et des ETM associés ; Cette analyse se déroulait au même site de prélèvement et dans les mêmes conditions d'échantillonnages et d'analyses que les notre.

Chapitre V

Résultats et discussions

« La qualité n'est jamais un accident ; c'est toujours le résultat d'un effort
intelligent.

Vivez avec le but, et laissez le résultat à la grande loi de l'univers »

(Albert Einstein 1879-1955)



Etudes des TSP et des ETM associés au niveau de Draria

V- 1- Etude des TSP

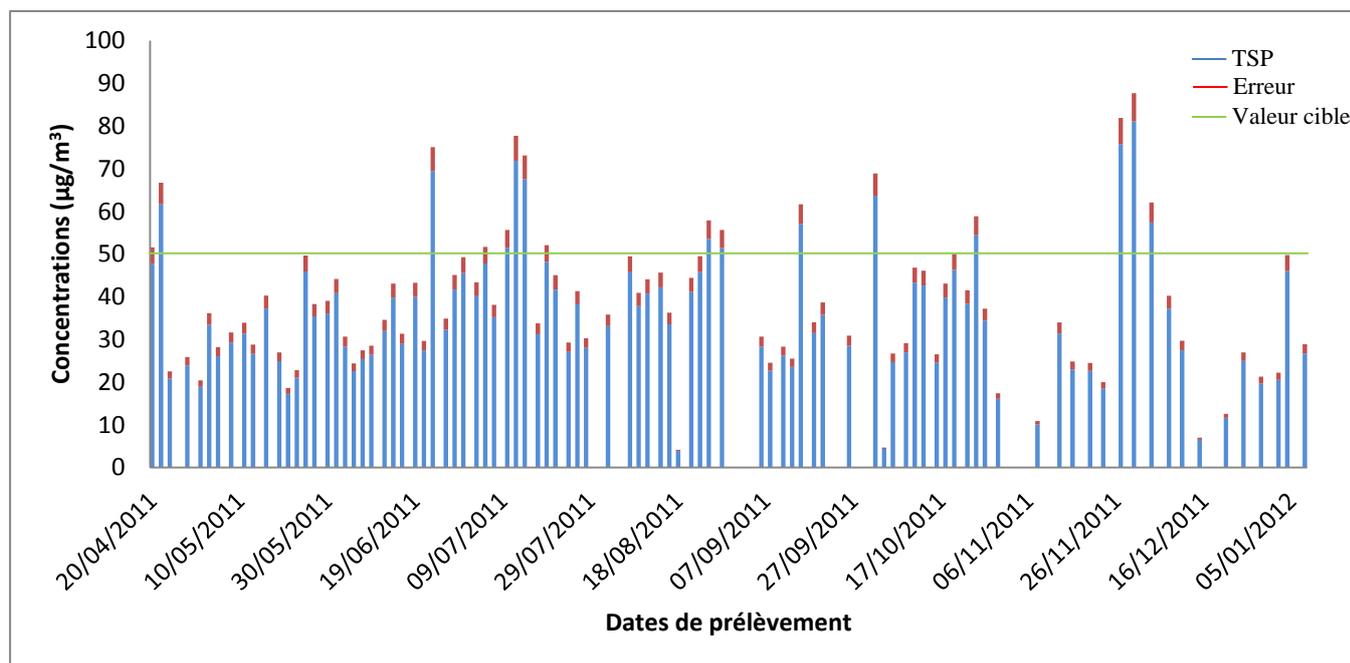


Figure V-1: Concentrations des TSP au cours du temps.

Nous remarquons que les teneurs en TSP mesurées pendant la période d'étude (du 20/04/2011 au 05/01/2012) varient de $3,84\mu\text{g}/\text{m}^3$ à $81,07\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec une moyenne de $34,88\mu\text{g}/\text{m}^3$. En tenant compte de la législation algérienne relative aux particules en suspension dans l'air, nous constatons que la pollution atmosphérique en TSP au niveau de Draria représentée par la moyenne est inférieure à la valeur cible algérienne ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$), nous remarquons que 14,5% des valeurs des TSP enregistrées dépassent $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que 85,5% des valeurs de TSP sont inférieures à la valeur cible.

Aucune des valeurs enregistrées n'a dépassé la valeur limite OMS sauf celle relative à la journée du 30/11/2011.

En comparant ces résultats avec ceux d'un autre site urbain (Alger centre), nous pouvons dire que la pollution atmosphérique en TSP à Draria n'est pas inquiétante.

Tableau V-1: Comparaison des TSP à Draria et à Alger centre.

Site	Concentration des TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Minimale	Moyenne	Maximale
Draria (zone d'étude)	3,84	34,88	81,07
Alger centre [47]	35	80	164

Les variations temporelles des teneurs en TSP dans l'air sont dues principalement aux :

- Trafic routier qui est la principale source de l'augmentation des teneurs atmosphériques en TSP dans la présente étude, cette pollution est due aux émissions des véhicules, en particulier les moteurs diesel connus par leur combustion incomplète, moteur usés et absence de filtre à air et de catalyseur placé au niveaux des pots d'échappement.
- Conditions météorologiques qui ont un rôle important dans la dispersion et le lessivage des polluants (vent, pluie, humidité).
- Topographie ainsi que les brises de mer à Alger jouent aussi un rôle non négligeable dans la dispersion des différents polluants atmosphérique [48].

V- 2- Etude des ETM associés aux TSP

Dans ce mémoire, l'étude des ETM associés aux TSP a été faite sur 05 expériences qui englobaient 82 échantillons, nous avons calculé l'erreur sur nos manipulations avec l'équation (IV-2). Nos prélèvements ont révélé l'existence de 20 éléments traces métallique dans l'air, les concentrations minimales, moyennes et maximales de ces ETM sont représentées dans le tableau V-2

Tableau V-2: Concentrations des ETM associés aux TSP.

Elément	Concentration (ng/m ³)			Elément	Concentration (ng/m ³)		
	Min.	Moy.	Max.		Min.	Moy.	Max.
Sm	0,012	0,074	0,248	Sc	0,027	0,172	0,380
Mo	0,104	0,292	0,491	Ce	0,248	1,686	5,357
As	0,106	0,433	0,907	Cr	0,085	2,131	9,767
Br	0,545	2,885	7,007	Sr	0,012	13,055	32,492
La	0,062	0,648	3,257	Zn	10,418	19,015	32,150
Na	0	85,299	514,405	Co	0,097	0,55	3,268
Sb	0,171	0,829	2,800	Fe	87,535	737,649	2104,436
Yb	0,0108	0,0375	0,1277	Cd	0,027	0,075	0,117
Eu	0,0144	0,0279	0,0628	Cs	0,045	0,137	0,3
Hf	0	0,0584	0,1521	Se	0,032	0,297	1,112

On remarque que le fer, le sodium, le zinc et le chrome sont les éléments les plus concentrés dans l'atmosphère de Draria.

Vu le nombre important des concentrations à représenter (83 prélèvements), le tracé de ces dernières avec leurs erreur était très encombré, c'est pour cette raison que nous n'avons représenté que les concentrations des ETM associés aux TSP.

La figure V-2 représente les concentrations de l'Ytterbium avec l'erreur commise sur la manipulation des 12 derniers prélèvements.

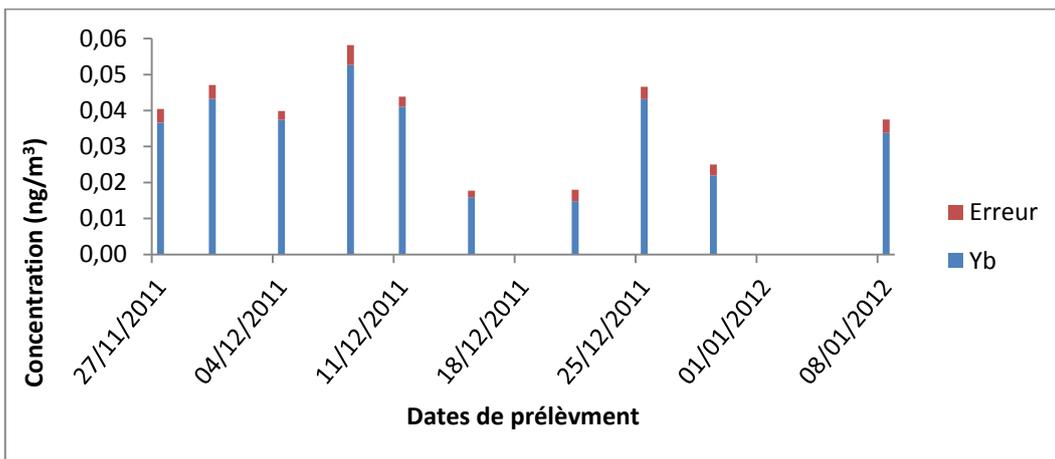


Figure V-2: Représentation de la concentration de l’Yb et les erreurs relatives des 12 derniers prélèvements.

V- 2- 1- Cérium (Ce)

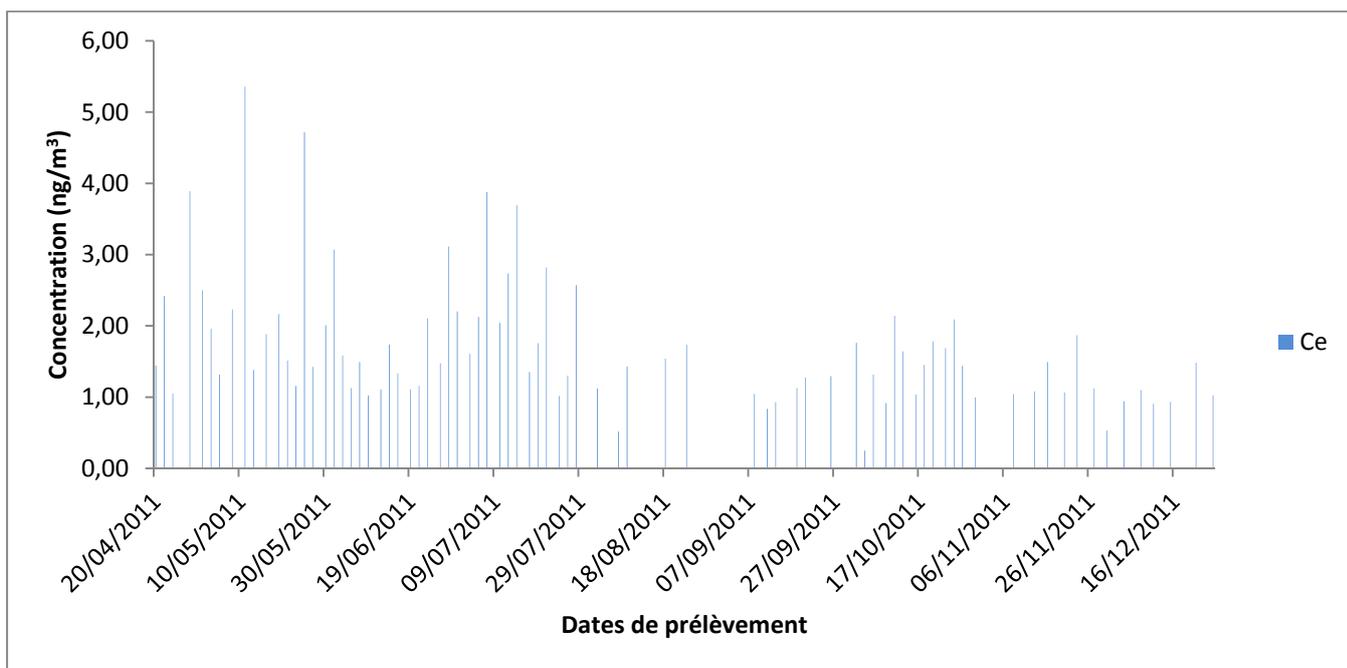


Figure V-3: Représentation des concentrations du Cérium (Ce).

Les fortes concentrations en cérium, de la famille des terres rares, à Drarïa peuvent être rapportées à ses applications dans les industries avoisinantes comme celle de la céramique, du polissage et de briqueteries [48].

V- 2- 2- Sodium (Na) et Fer (Fe)

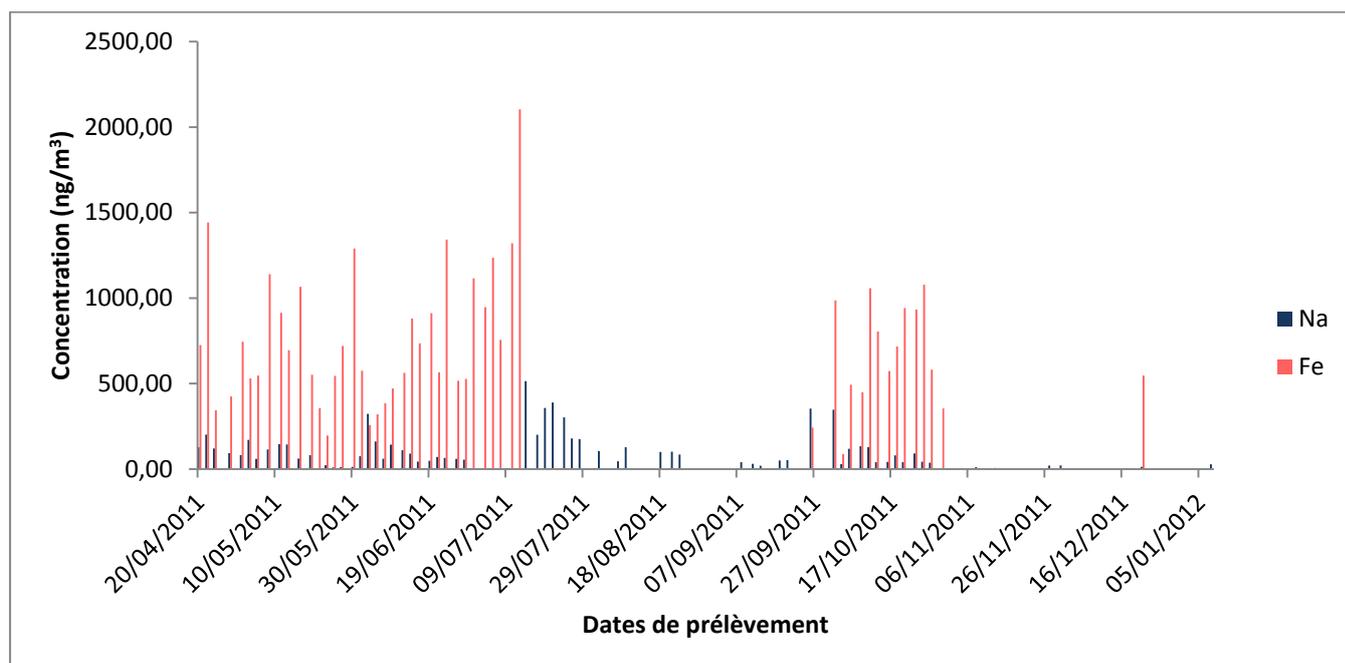


Figure V-4: Représentation des concentrations du Sodium (Na) et du Fer (Fe).

Les concentrations élevées du sodium (Na) dans l'atmosphère de Drarïa peut être considérée comme naturelle ; en effet, le sodium est le sixième élément le plus abondant dans la croûte terrestre, qui contient 2.83% de sodium sous toutes ses formes. Le sodium est, après le chlore, le deuxième élément dissous le plus abondant dans l'eau de mer, vu la proximité de la zone d'étude par rapport de la mer méditerranéenne (7,5 Km) et son ouverture sur un couloir aérien assez important, ces phénomènes naturels étaient l'origine de la détection des concentrations élevées en Sodium [49].

La principale source d'émission atmosphérique du fer (Fe) est d'origine naturelle puisque il résulte de la remise en suspension des particules du sol [48]. Le fer peut aussi provenir du trafic routier (usure des freins).

V- 2- 3- Brome (Br) et Chrome (Cr)

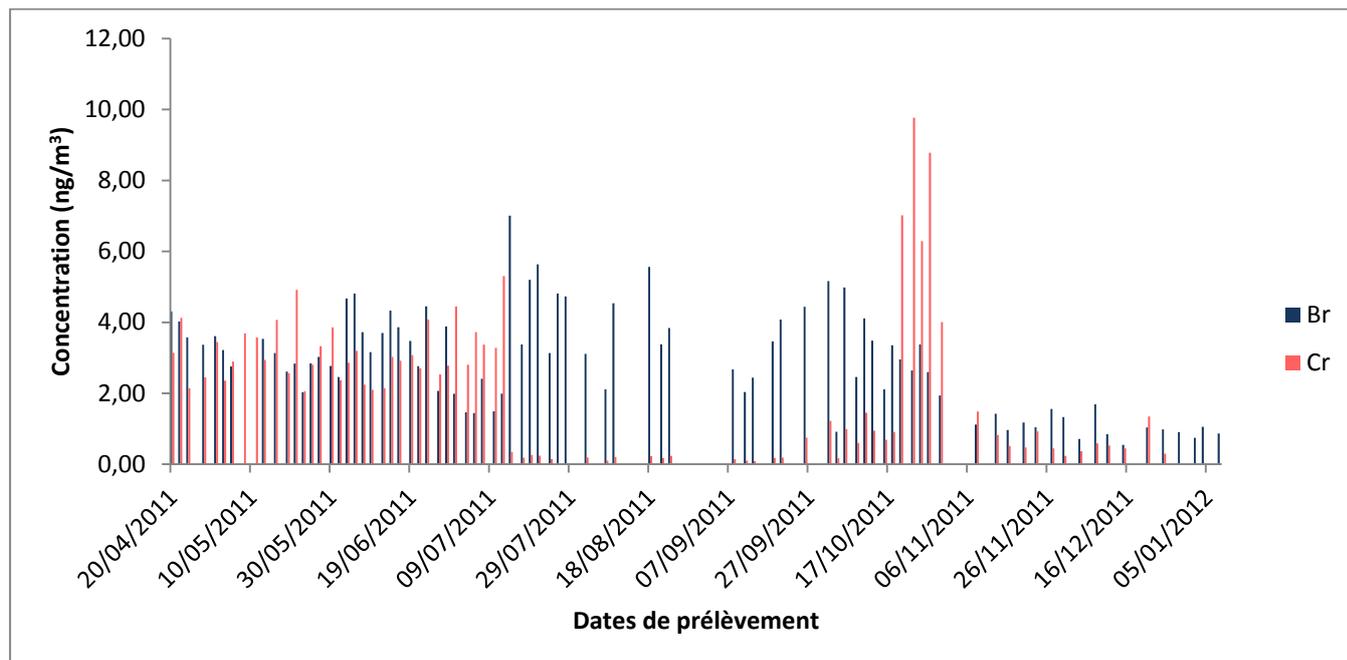


Figure V-5: Représentation des concentrations du Brome (Br) et du Chrome (Cr).

La présence du Brome (Br) est principalement due au trafic routier. En effet, le dibromoéthane ($C_2H_4Br_2$) est un additif qui transforme les dérivés du plomb en Bromure et Chlorure de plomb, utilisé dans le carburant pour éviter la formation de dépôt de plomb (Pb) dans les chambres de combustion et les systèmes d'échappement [56].

La présence du Chrome (Cr) peut être expliquée par la remise en suspension de particules par le vent [50]. Le Chrome est émis dans l'atmosphère par la combustion des essences, des revêtements des pots catalytiques ou de l'usure des jantes [50], ajouté à cela sa large utilisation dans les industries de polissages et de céramiques, les briques réfractaires, de revêtements intérieurs de fournaies, les mortiers et de produits mis en forme par moulage, de même que dans les matériaux de revêtement pour fermer les pores et pour joindre les briques dans les fournaies [57].

V- 2- 4- Samarium (Sm) et Cadmium (Cd)

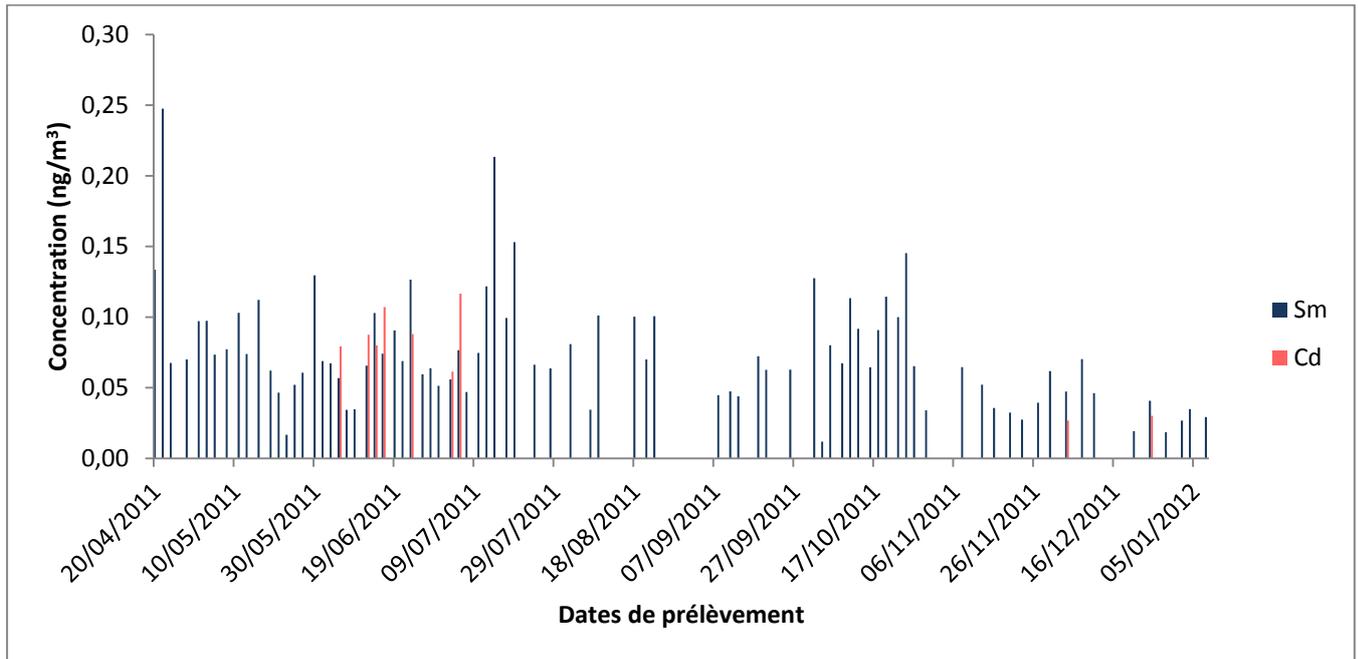


Figure V-6: Représentation des concentrations du Samarium (Sm) et du Cadmium (Cd).

L’origine de la pollution par le samarium (Sm) peut provenir des industries de céramique et de polissage situées dans la ville [48].

Le Cadmium (Cd) a atteint sa valeur maximale de 0,12 ng/m³ le 05/07/2011, cette concentration était en dessous la norme (05 ng/m³) fixée par l’OMS ainsi que par l’Union Européenne. La pollution en Cadmium au niveau de Daria n’est pas inquiétante.

V- 2- 5- Lanthane (La) et Antimoine (Sb)

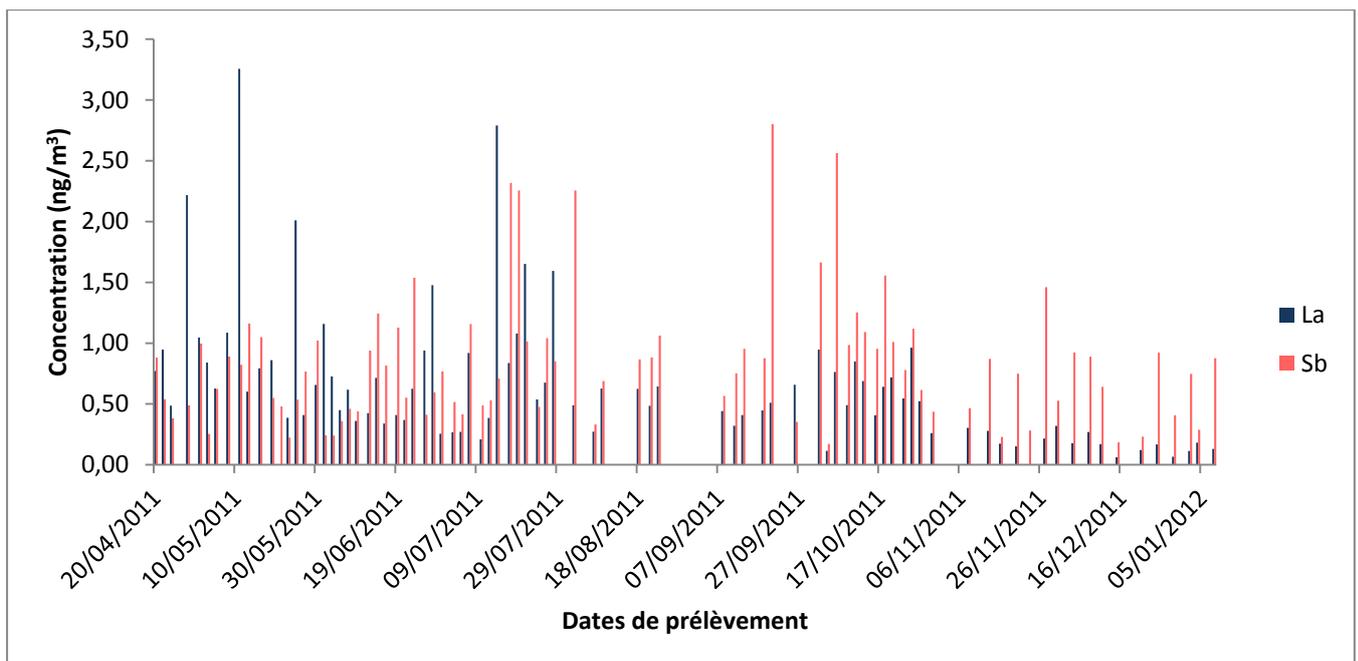


Figure V-7: Représentation des concentrations du Lanthane (La) et de l’Antimoine (Sb).

L'Antimoine (Sb) entre dans la composition des alliages métalliques et ces oxydes (trioxydes d'antimoine) comme pigment de peinture qui reste longtemps en suspension dans l'air. La forte concentration à Drarïa peut s'expliquer par l'industrie de la coloration de céramique.

L'origine de la pollution par le Lanthane (La) peut provenir des industries de céramique et de polissage situées dans la ville [48].

V- 2- 6- Gadolinium (Gd) et Sélénium (Se)

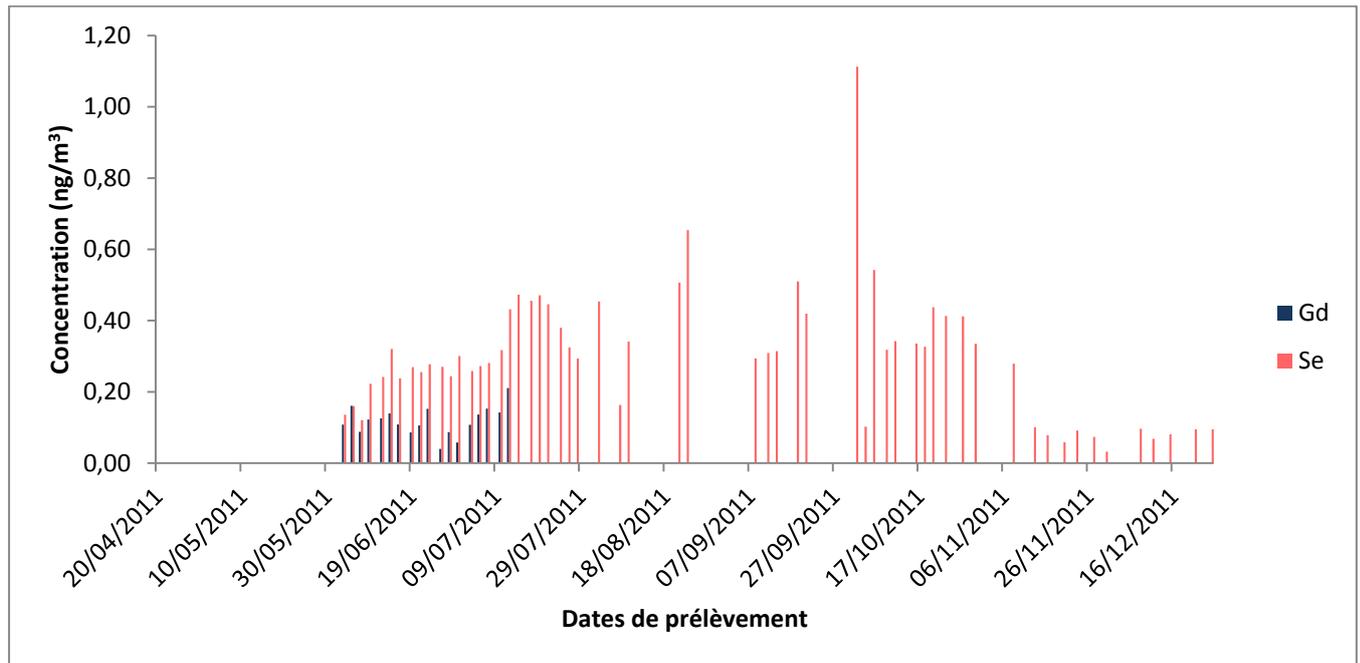


Figure V-8: Représentation des concentrations du Gadolinium (Gd) et du Sélénium (Se).

La forte teneur en sélénium (Se) peut être expliquée par son utilisation dans les industries du verre, de la céramique, des peintures et des vernis, certains composés sont utilisés comme pigments (sélénite d'ammonium et sodium) [50].

V- 2- 7- Ytterbium (Yb) et Hafnium (Hf)

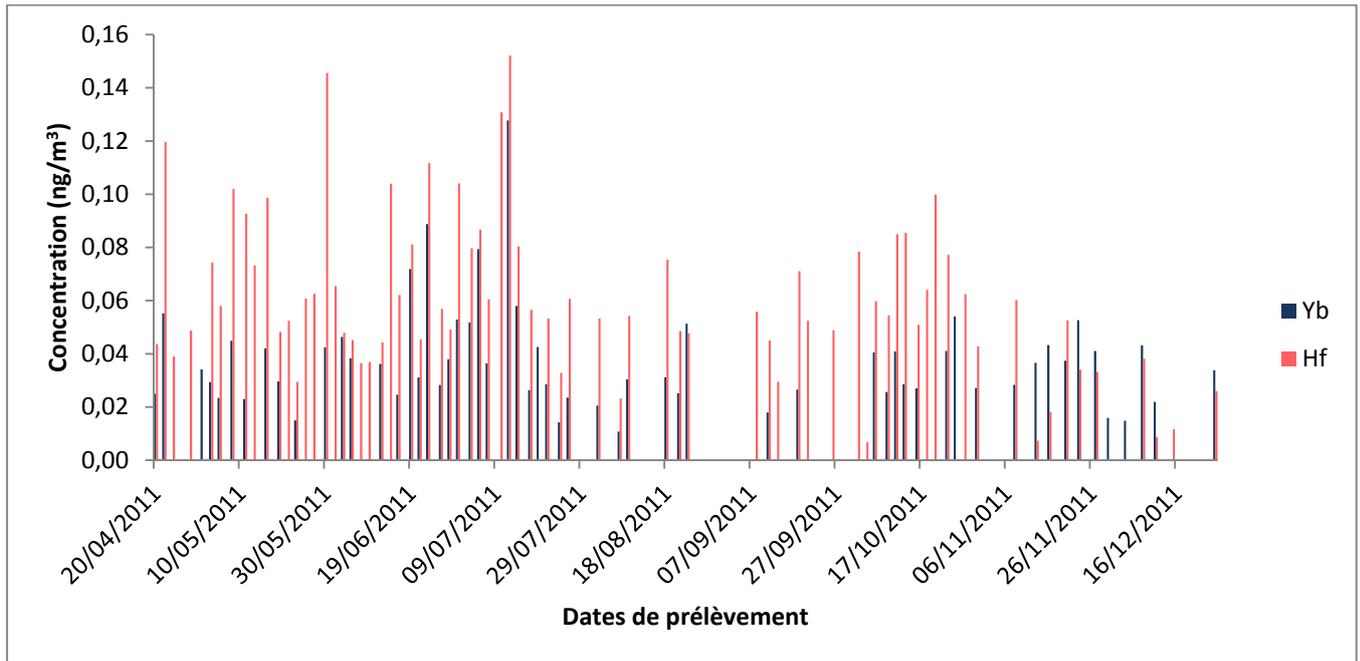


Figure V-9: Représentation des concentrations de l’Ytterbium (Yb) et du Hafnium (Hf).

Le Hafnium est utilisé dans plusieurs domaines industriels, entre autre l’industrie nucléaire, la présence du Hafnium dans l’atmosphère s’explique aussi par la remise en suspension des particules [58].

L’origine de la pollution par l’Ytterbium (Yb) c’est qu’il est utilisé en catalyse, métallurgie, l’industrie du verre et de la céramique, la détection de l’Ytterbium au niveau de Drariá peut s’expliquer par l’industrie de la céramique installée dans la ville.

V- 2- 8- Scandium (Sc) et Cobalt (Co)

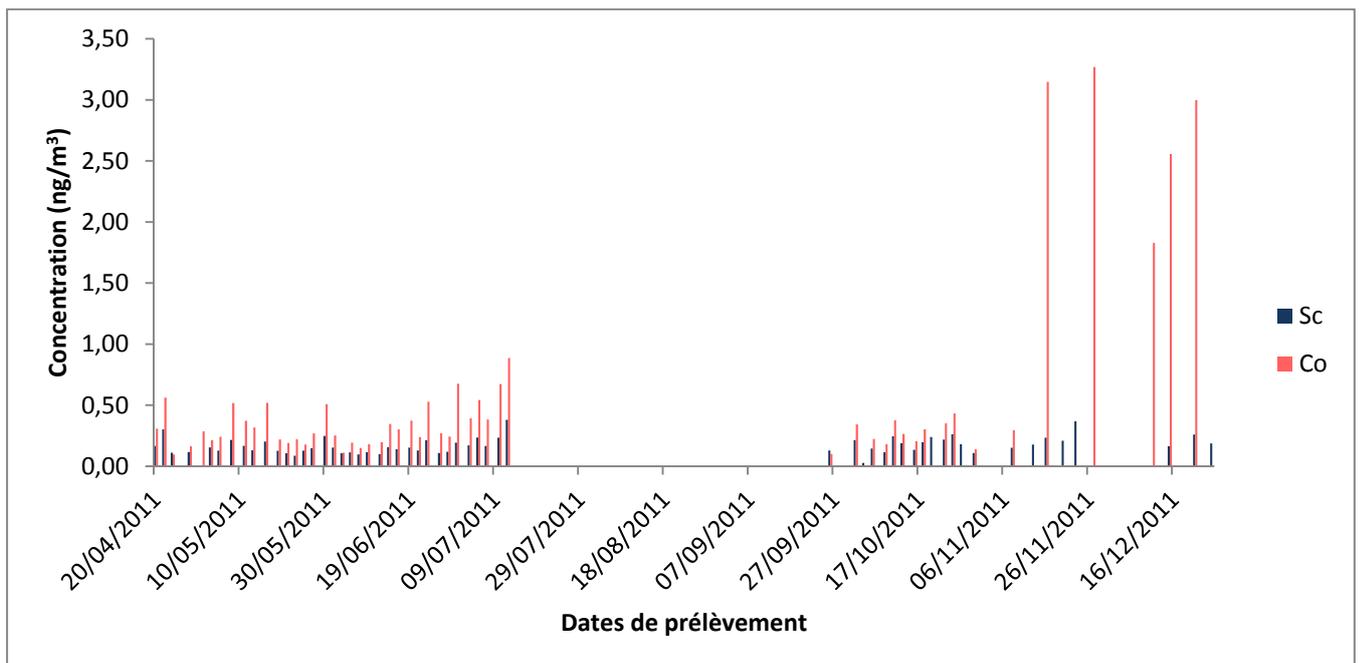


Figure V-10: Représentation des concentrations du Scandium (Sc) et du Cobalt (Co).

Les fortes concentrations en scandium (Sc) à Drarïa peuvent être rapportées à son application dans les industries avoisinantes comme celle de la céramique, du polissage et de briqueteries.

La présence significative de cobalt (Co) peut être expliquée par l'emploi des composés de cobalt dans les colorants pour le verre, le papier, la céramique, et les peintures (carbonate et chromate de cobalt) et aux émissions du trafic routier mais également il peut provenir du sol [59].

V- 2- 9- Molybdène (Mo) et Arsenic (As)

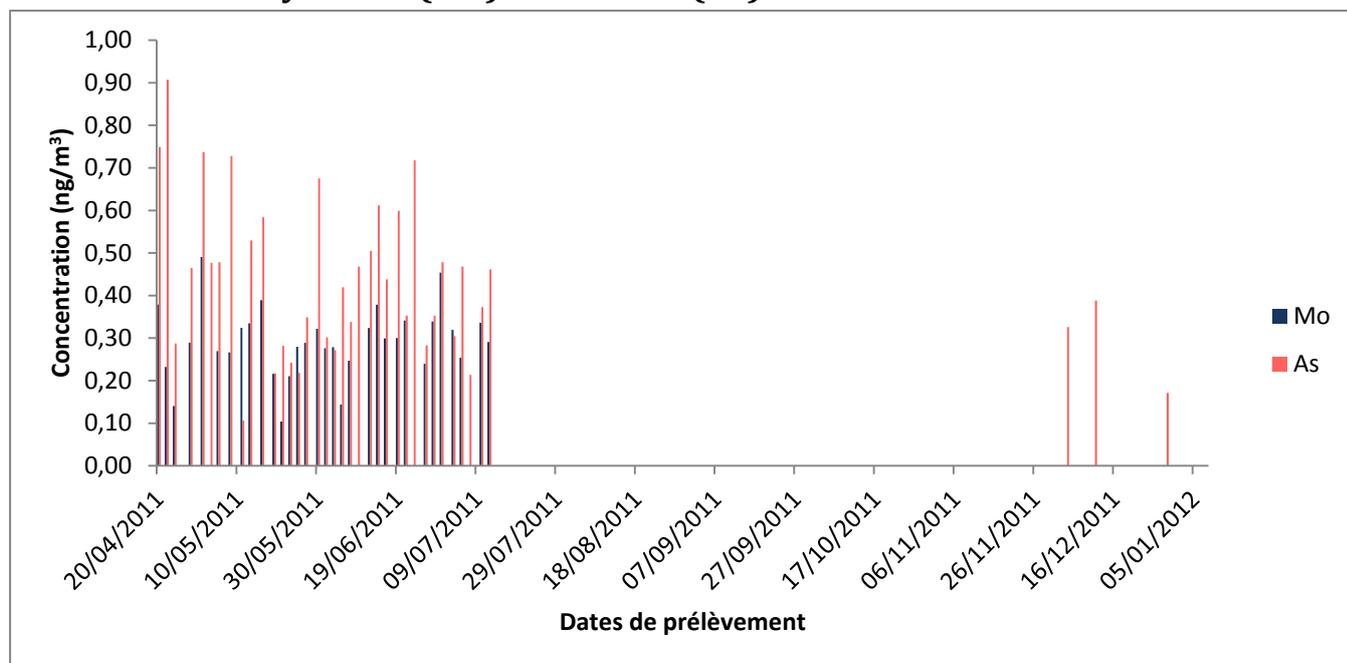


Figure V-11: Représentation des concentrations du Molybdène (Mo) et de l'Arsenic (As).

La présence de l'Arsenic (As) dans l'atmosphère s'explique par son utilisation dans [60]:

- Les batteries électriques pour augmenter la résistance à la corrosion.
- Les herbicides pour l'agriculture.
- Dans les alliages avec le cuivre, le plomb, l'or pour augmenter leur dureté.
- Agents décolorants dans l'industrie du verre.

La concentration maximale en Arsenic a été de $0,91 \text{ ng/m}^3$, enregistrée le 22/04/2011, cette concentration était en dessous la norme (06 ng/m^3) fixée par l'OMS ainsi que par l'Union Européenne. La pollution en Arsenic au niveau de Daria n'est pas inquiétante.

V- 2- 10- Strontium (Sr) et Zinc (Zn)

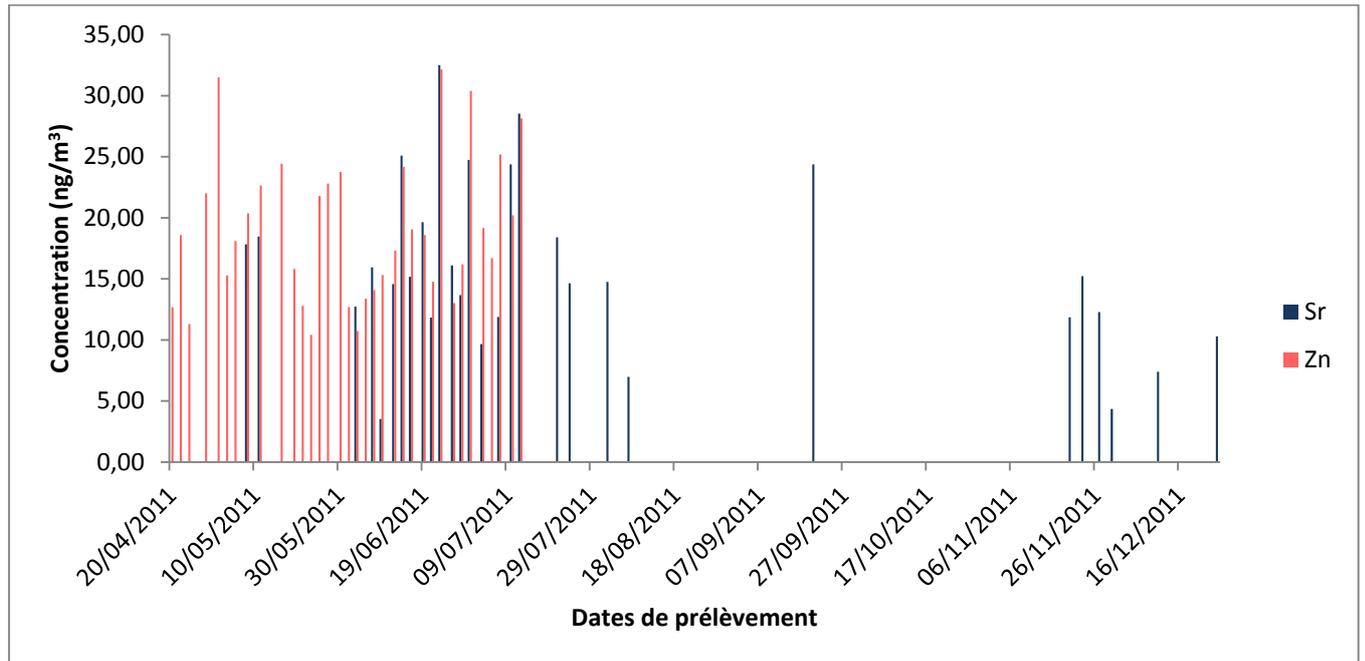


Figure V-12: Représentation des concentrations du Strontium (Sr) et du Zinc (Zn).

Les apports anthropiques de zinc (Zn) dans l'environnement résultent de trois groupes d'activités :

- Les processus de raffinage qui dégagent de grandes quantités de composés du zinc et notamment les oxydes du zinc.
- L'utilisation des dérivés du zinc comme pigments dans les industries de céramiques.
- Il entre naturellement dans l'atmosphère à partir du transport des particules du sol via le vent [50].

V- 2- 11- Europium (Eu) et Césium (Cs)

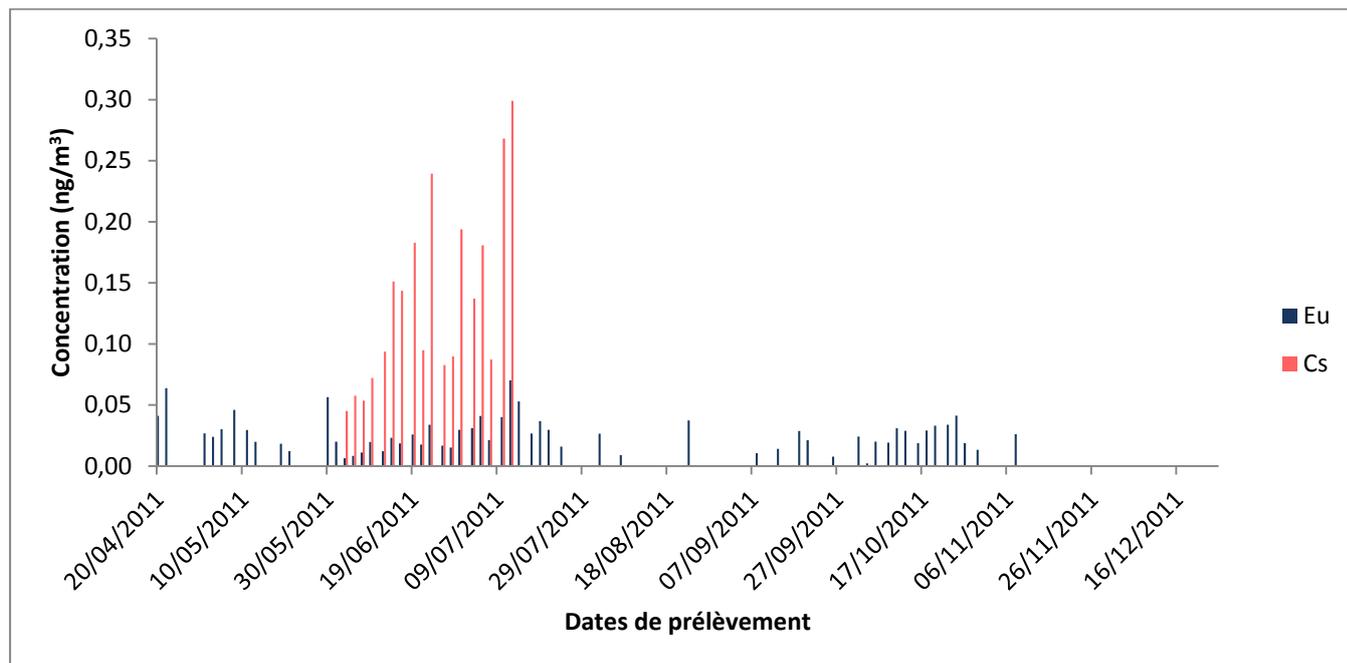


Figure V-13: Représentation des concentrations de l'Europium (Eu) et du Césium (Cs).

Les fortes concentrations en europium (Eu) peuvent être rapportées à son application dans les industries avoisinantes comme celle de la céramique, du polissage et de briqueteries.

La principale source d'émission atmosphérique du césium (Cs) est en grande partie d'origine naturelle puisque ils résultent de la remise en suspension des particules du sol [58].

V- 3- Comparaison des ETM quantifiés au niveau de Drarïa avec autres villes mondiales

Tableau V-3: Comparaison des ETM de la présente zone d'étude avec d'autres villes mondiales [47].

Ville	Drarïa (Zone d'étude)	Alger centre	Göteborg	Copenhague		Hanoi	Chandigarh
				Site 1	Site 2		
Nature du site	Site périurbain	Site urbain	Site urbain	Site de proximité	Site urbain	Site urbain	Site urbain
Cr	2,13	35,45	/	271	645	3,8	180
Fe	737,64	1380	1190	18,5	8,69	320	20277
Sb	0,82	2,17	/	123	40	/	/
Br	2,88	/	9	/	/	/	/
Sc	0,17	/	/	/	/	/	/
Hf	0,06	0,067	/	/	/	/	/
Ce	1,68	/	/	703	4,5	/	/
Co	0,55	0,64	/	8,5	20,8	/	/
Zn	19,01	/	/	13	4,5	100	1209
Se	0,3	0,74	49	2,88	36,8	/	/

La comparaison des résultats de quantification des ETM associés aux TSP avec des données similaires des autres villes mondiales montre que les moyennes des valeurs enregistrées à Drariïa restent relativement faibles par rapport à celles enregistrées dans d'autres villes à l'exception du fer qui révèlent des moyennes supérieures à celle de Copenhague (Danemark) mais largement inférieure à celle des autres villes.

Malgré l'explosion démographique et l'augmentation exponentielle du trafic routier remarquées à Drariïa, l'étude et le suivis de la concentration en éléments de trace métalliques reste un facteur à évaluer de très près.

La connaissance du niveau de pollution par les métaux dans une grande agglomération telle que la wilaya d'Alger demeure une tâche délicate nécessitant le déploiement d'efforts considérables. Les études antérieures en milieu urbain et périurbain, au niveau de cette wilaya, ont révélé la présence d'une pollution atmosphérique importante par les métaux lourds générés par les émissions automobiles.

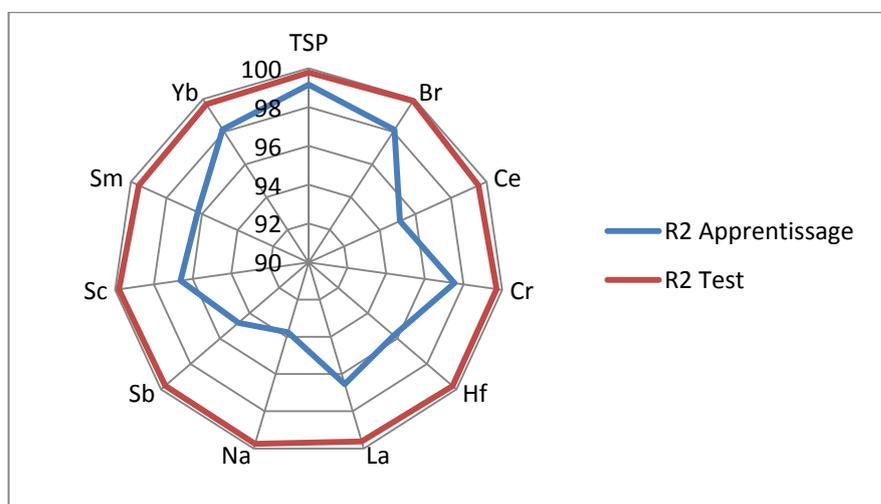
Modélisation des TSP et des ETM associés au niveau de Drarïa

V- 4- La chronologie des observations

Comme nous avons effectué un prélèvement chaque deux à trois jours (parfois plus quand il se coïncide avec un week-end), la détermination des concentrations intermédiaires (entre chaque deux prélèvements successives) des ETM à modéliser est nécessaire pour avoir une série chronologique *continue* des observations, pour ce faire, nous avons utilisé les réseaux de neurones, l'architecture et l'apprentissage de ces réseaux était le suivant :

Tableau VI-1:Réseaux de neurones d'élaboration des chronologies.

Elément	Apprentissage					Test
	Architecture	Fonction	Algorithme	R ²	Itérations	R ² (%)
TSP	[10-1]	T-P	LM	99,16	213	99,78
Brome (Br)	[2-20-1]	T-T-P	LM-BR	98,12	351	99,89
Cérium (Ce)	[10-1]	T-P	LM	95,13	872	99,54
Chrome (Cr)	[4-15-1]	T-T-P	LM-BR	97,53	634	99,71
Hafnium (Hf)	[5-2-1]	T-T-P	LM-BR	95,76	214	99,74
Lanthane (La)	[20-4]	T-P	LM	96,54	1489	99,62
Sodium (Na)	[10-2-1]	T-P	LM-BR	93,76	713	99,75
Antimoine (Sb)	[10-2-15-1]	T-T-T-P	LM-BR	94,76	815	99,71
Scandium (Sc)	[10-2]	T-P	LM	96,62	142	99,81
Samarium (Sm)	[8-20-2-1]	T-T-T-P	LM-BR	96,24	175	99,55
Ytterbium (Yb)	[20-4-2-1]	T-T-T-P	LM-BR	98,14	1126	99,68

**Figure V-14:** Résultat de la création des séries chronologiques.

La représentation graphique des séries chronologiques élaborées dans ce paragraphe ainsi que les observations réelles ne sont pas représentées dans ce paragraphe pour que nous évitions la redondance des graphes. Cette représentation est détaillée dans le paragraphe suivant.

V- 5- Modélisation par lissage exponentiel double (LED)

En se basant sur les équations décrivant le modèle LED (Chapitre III-4-3), l'exécution de notre algorithme traduit en code Matlab v7.5 (2010) ont donné les résultats suivants :

V- 5- 1- Les TSP

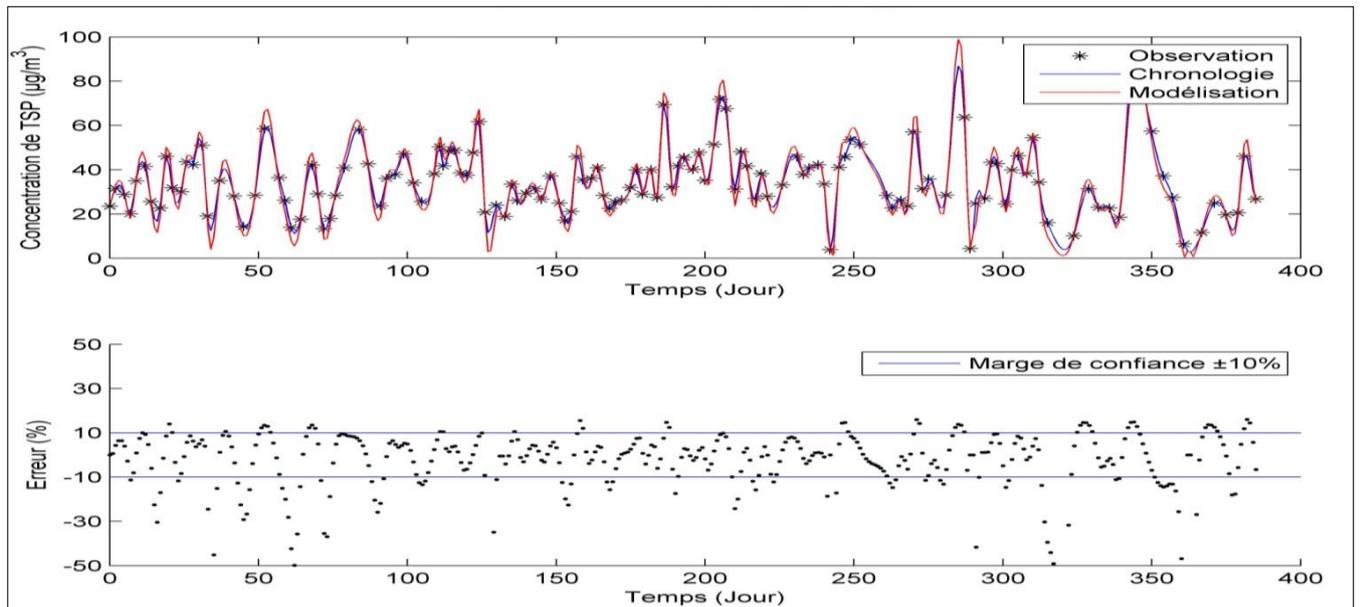


Figure V-15: LED des TSP.

R^2 (%)	ω	VCDME(%)
98,87	0,52	69,17

V- 5- 2- Le Samarium (Sm)

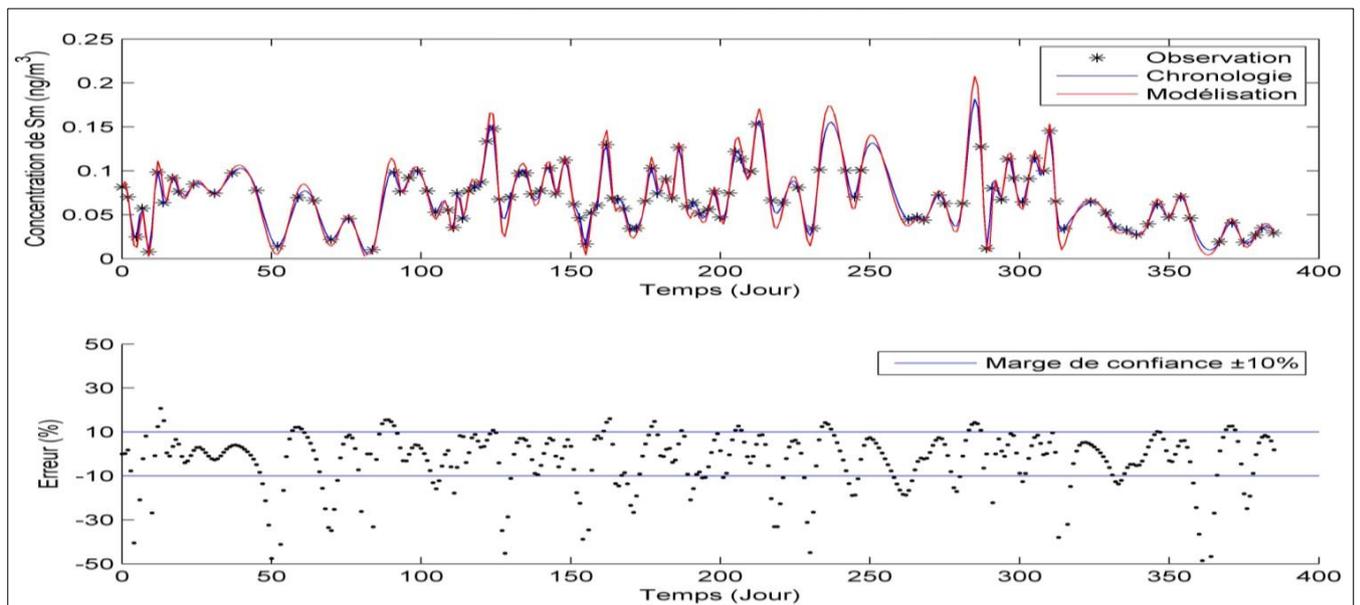


Figure V-16: LED du Samarium (Sm).

R^2 (%)	ω	VCDME(%)
98,86	0,51	71,24

V- 5- 3- Le brome (Br)

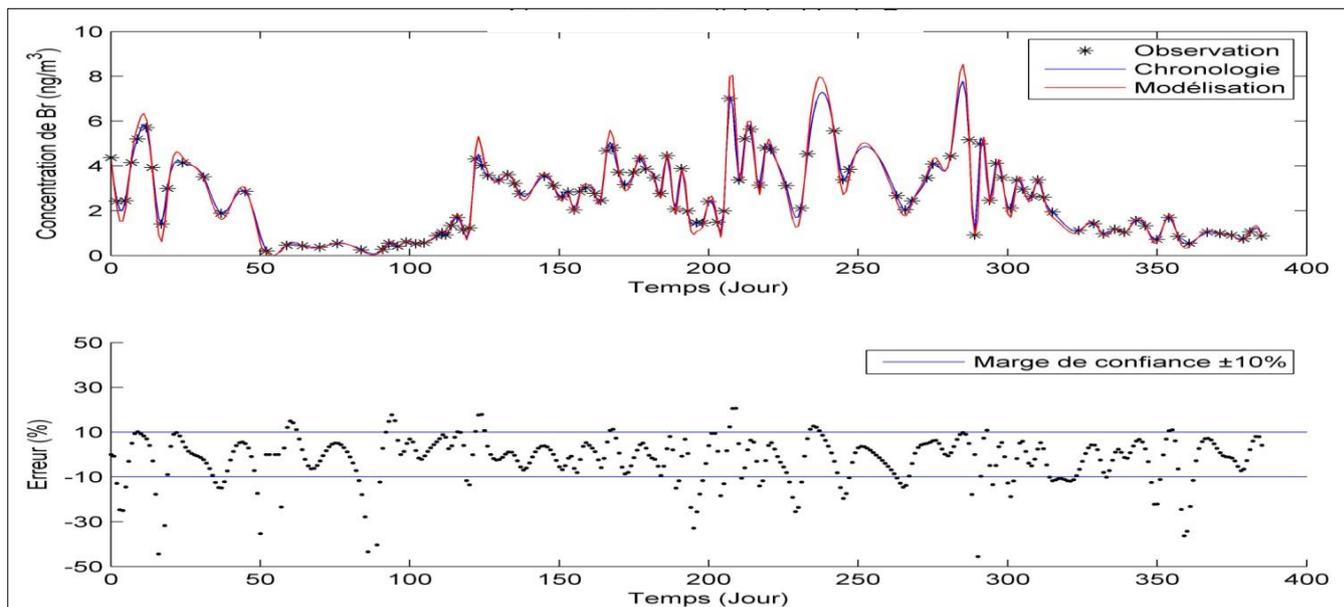


Figure V-17: LED du Brome(Br).

R^2 (%)	ω	VCDME(%)
99,13	0,51	77,46

V- 5- 4- Le Cérium (Ce)

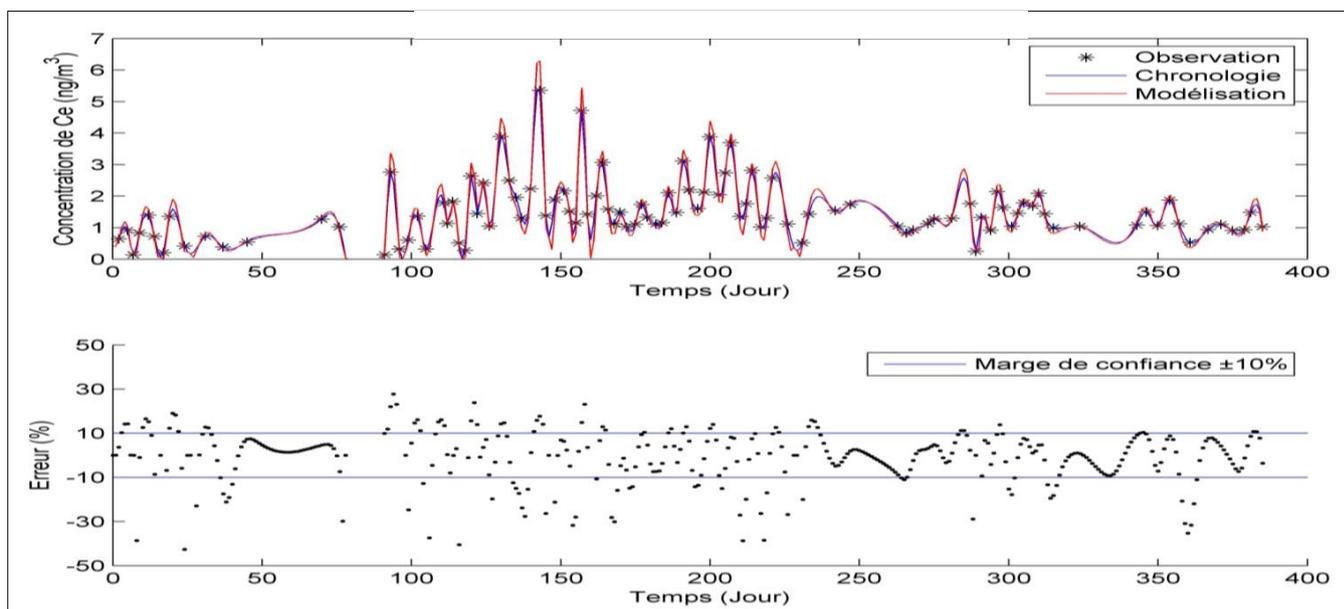


Figure V-18: LED du Cérium(Ce).

R^2 (%)	ω	VCDME (%)
98,68	0,55	68,13

V- 5- 5- Le Chrome (Cr)

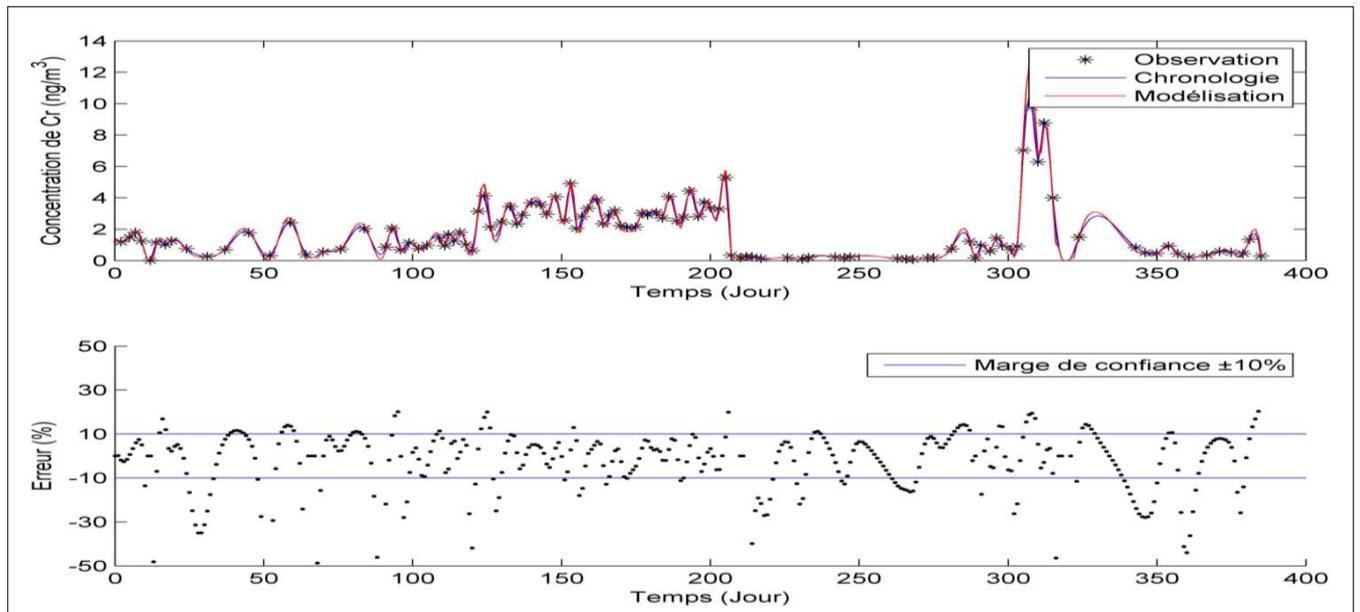


Figure V-19: LED du Chrome(Cr).

R^2 (%)	ω	VCDME (%)
99,32	0,49	66,32

V- 5- 6- Le Scandium (Sc)

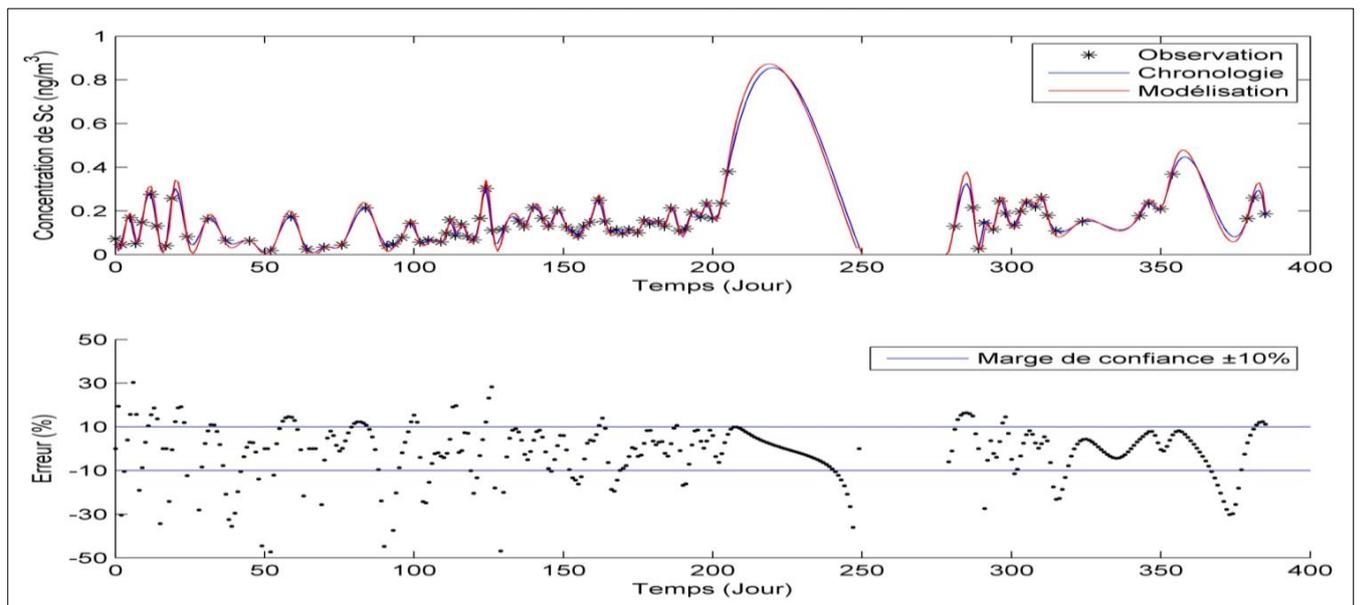


Figure V-20: LED du Scandium(Sc).

R^2 (%)	ω	VCDME (%)
99,55	0,47	63,99

V- 5- 7- L'Ytterbium (Yb)

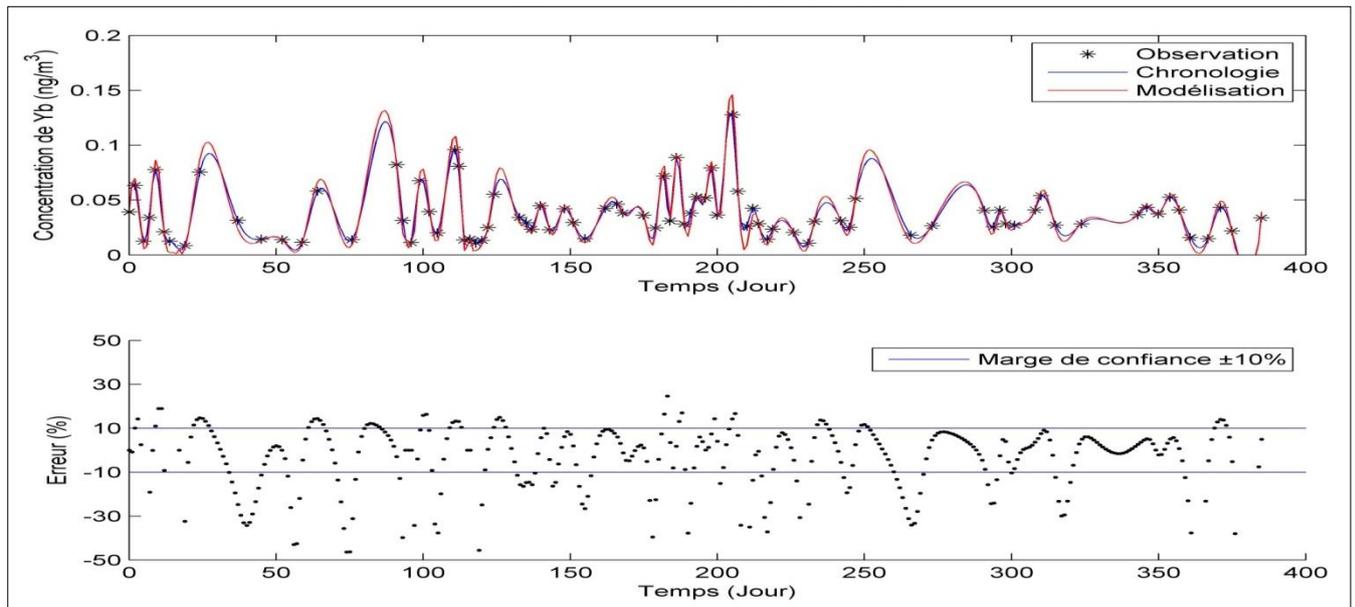


Figure V-21: LED de l'Ytterbium(Yb).

R^2 (%)	ω	VCDME (%)
99,06	0,49	59,06

V- 5- 8- Le Lanthane (La)

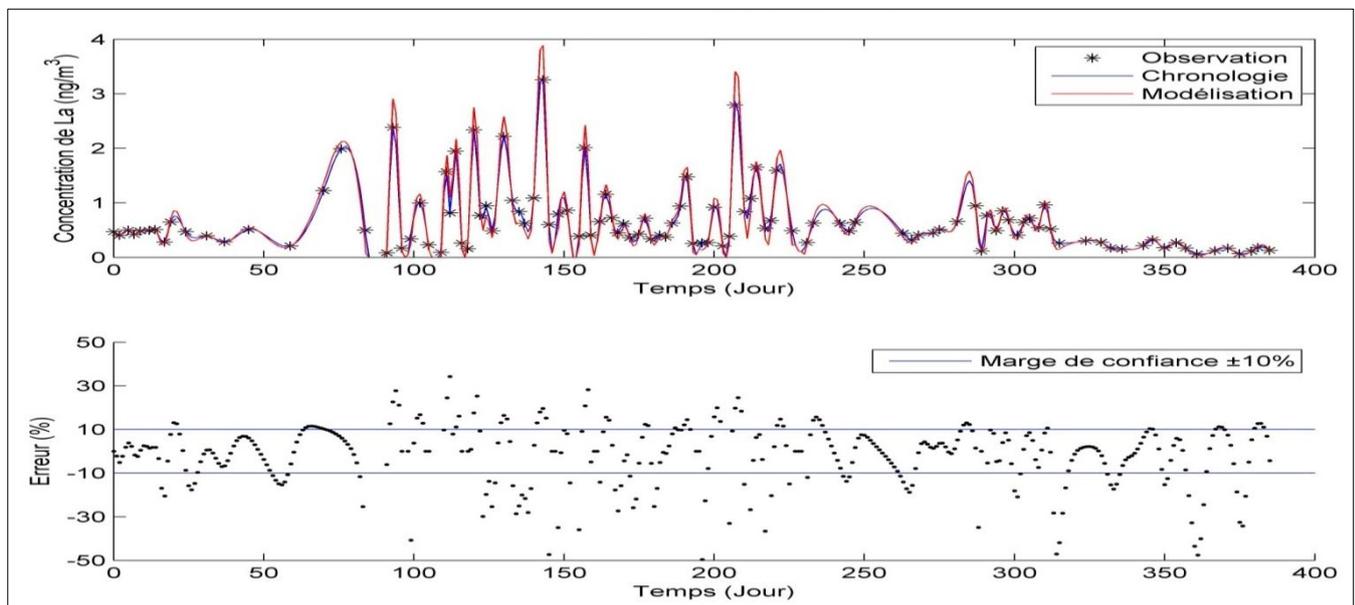


Figure V-22: LED du Lanthane(La).

R^2 (%)	ω	VCDME(%)
98,97	0,56	59,59

V- 5- 9- L'Antimoine(Sb)

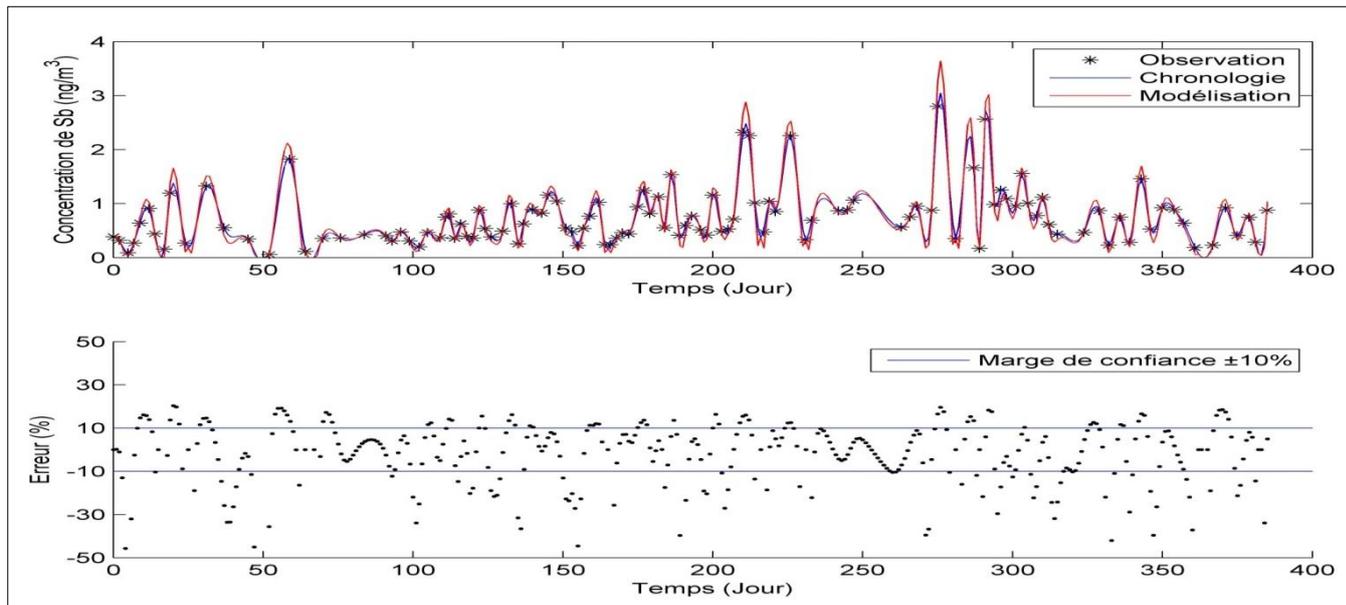


Figure V-23: LED de l'Antimoine (Sb).

R^2 (%)	ω	VCDME(%)
98,84	0,54	55,96

V- 5- 10- Le Hafnium (Hf)

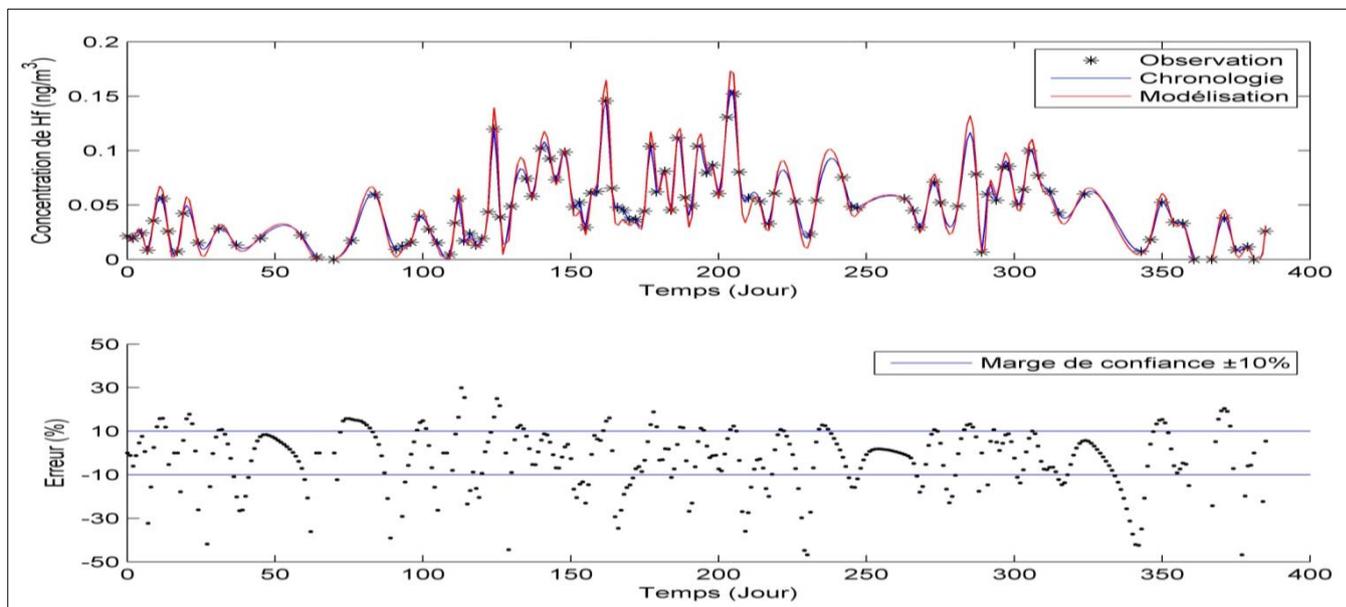


Figure V-24: LED du Hafnium(Hf).

R^2 (%)	ω	VCDME(%)
98,85	0,52	58,03

V- 5- 11- Le Sodium (Na)

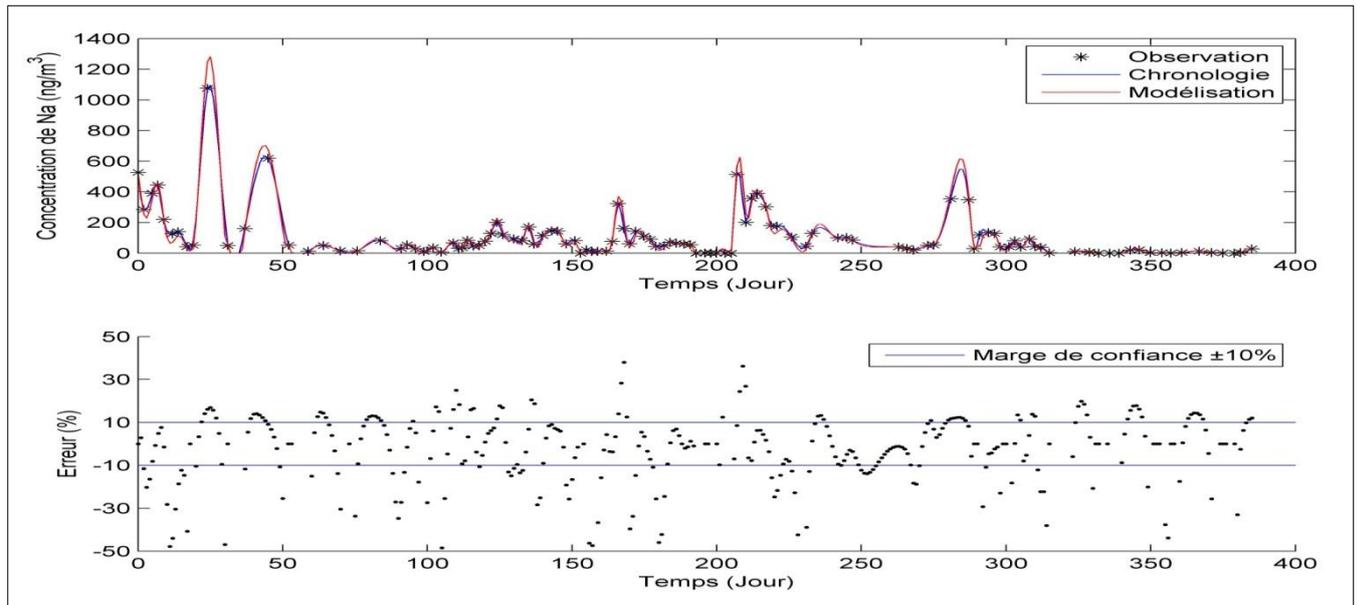


Figure V-25: LED du Sodium(Na).

R^2 (%)	ω	VCDME(%)
99,36	0,47	47,93

V- 5- 12- Résumé de la modélisation par LED

Tableau V-4: Résumé de la modélisation par lissage exponentiel double.

Élément	R^2 (%)	VCDME (%)	ω
Br	99,13	77,46	0,51
Sm	98,86	71,24	0,51
TSP	98,87	69,17	0,52
Ce	98,68	68,13	0,55
Cr	99,32	66,32	0,49
Sc	99,55	63,99	0,47
La	98,97	59,59	0,56
Yb	99,06	59,06	0,49
Hf	98,85	58,03	0,52
Sb	98,84	55,96	0,54
Na	99,36	47,93	0,47

V- 6- Modélisation par le modèle ARMA

Les corrélogrammes des éléments à modéliser ont tous révélé l'existence d'une forte autocorrélation entre l'ensemble des observations relatives à chaque élément à modéliser et les retards 1, 2, 3, 4 et 5 et une corrélation partielle nulle avec le retard 5 d'autre part donc les retards d'observations retenus dans cette méthode de modélisation est de type AR(1), AR(2), AR(3) et AR(4) pour tous les éléments, la modélisation par ARMA est la suivante :

V- 6- 1- Les TSP

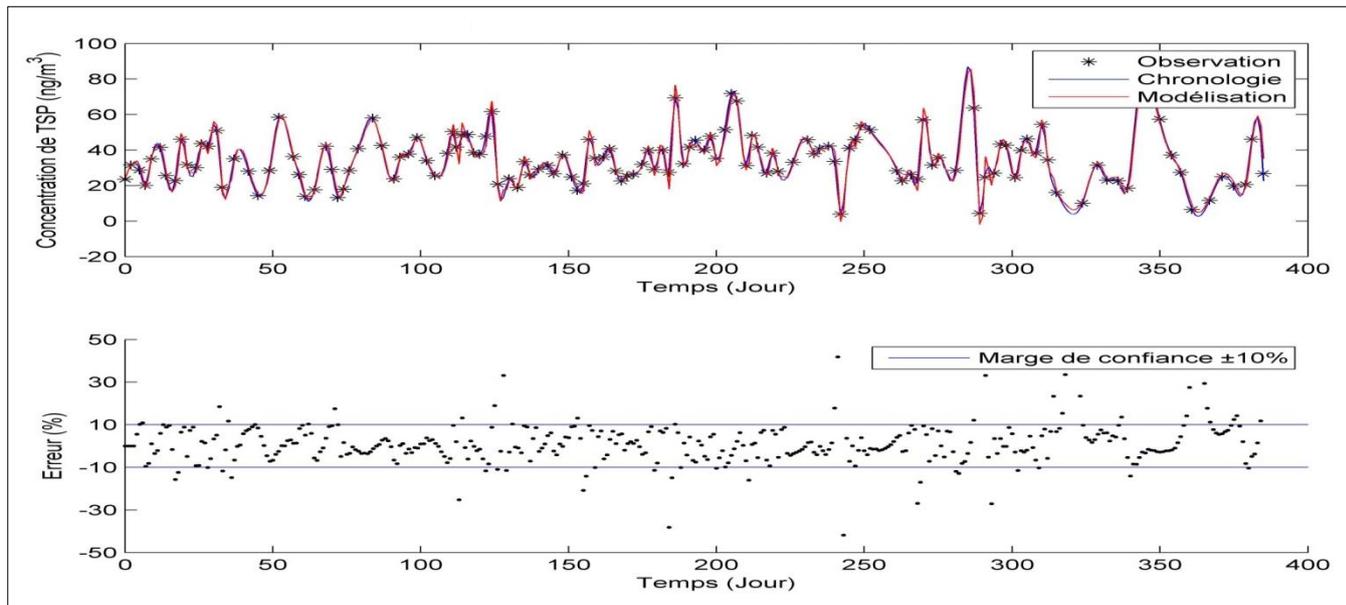


Figure V- 26: Modélisation des TSP par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
98,30	3,39512	2,454984	-2,836557	1,861202	-0,578551	84,97

V- 6- 2- Le Brome (Br)

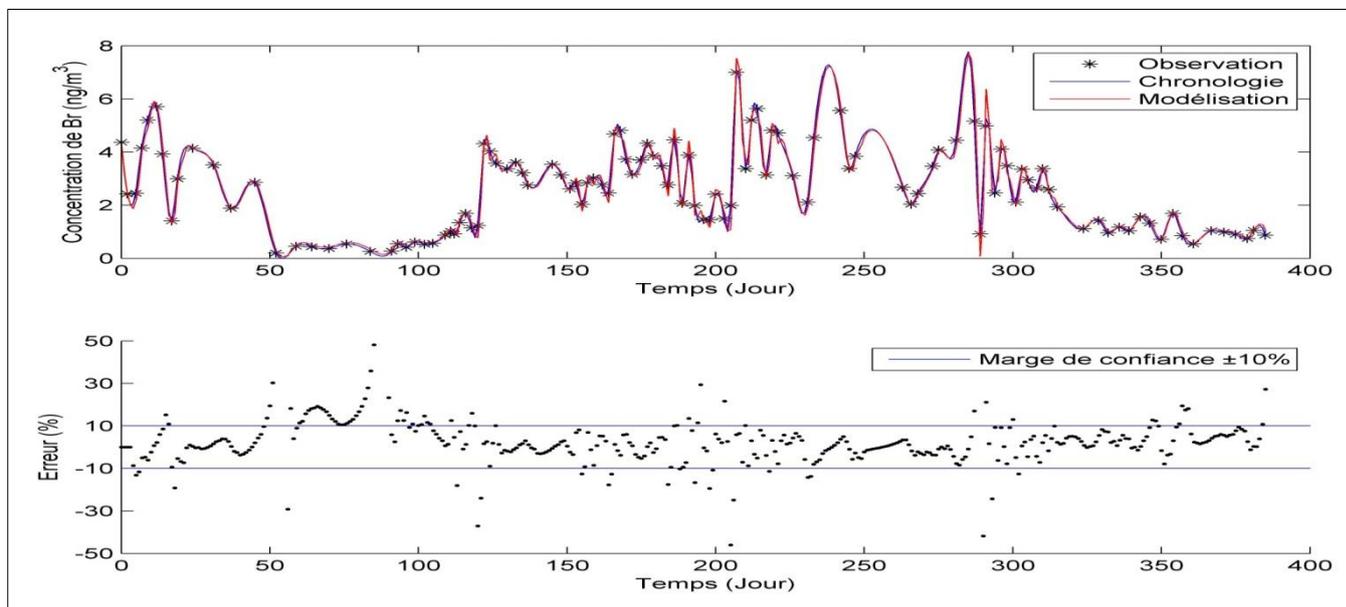


Figure V-27: Modélisation du Brome (Br) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
99,14	0,076318	2,454034	-2,794578	1,843777	-0,533579	79,02

V- 6- 3- Le Cérium (Ce)

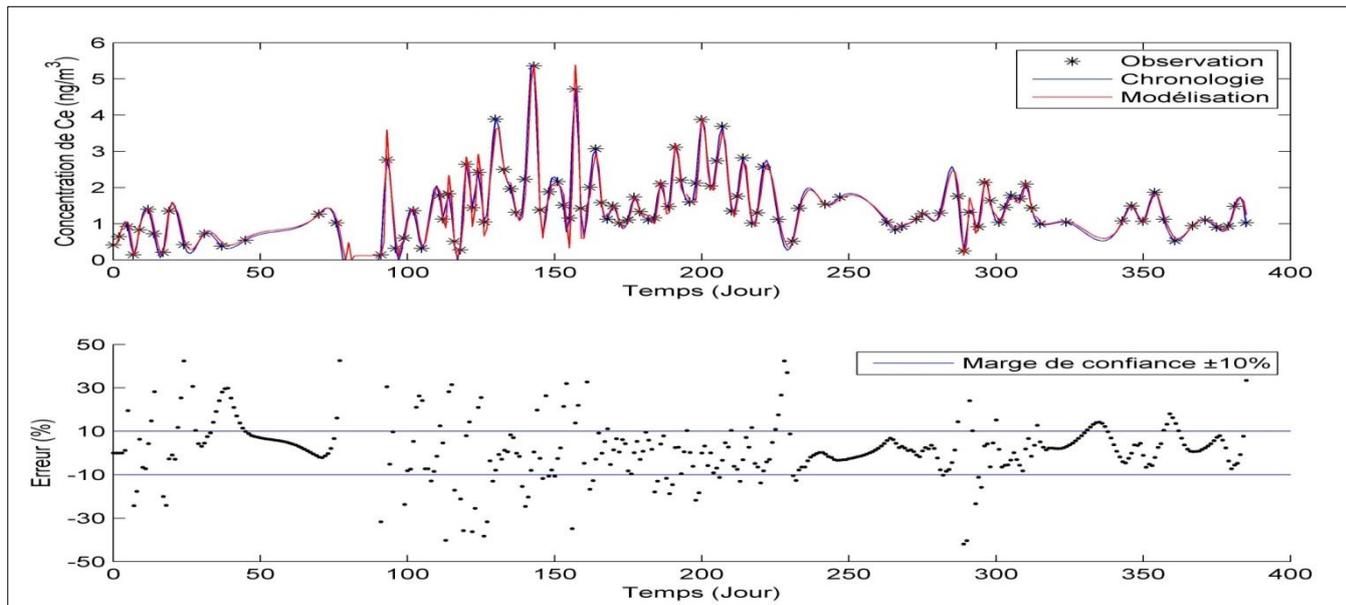


Figure V-28: Modélisation du Cérium (Ce) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
97,02	0,119304	2,189396	-2,317003	1,382718	-0,345543	68,13

V- 6- 4- Le Chrome (Cr)

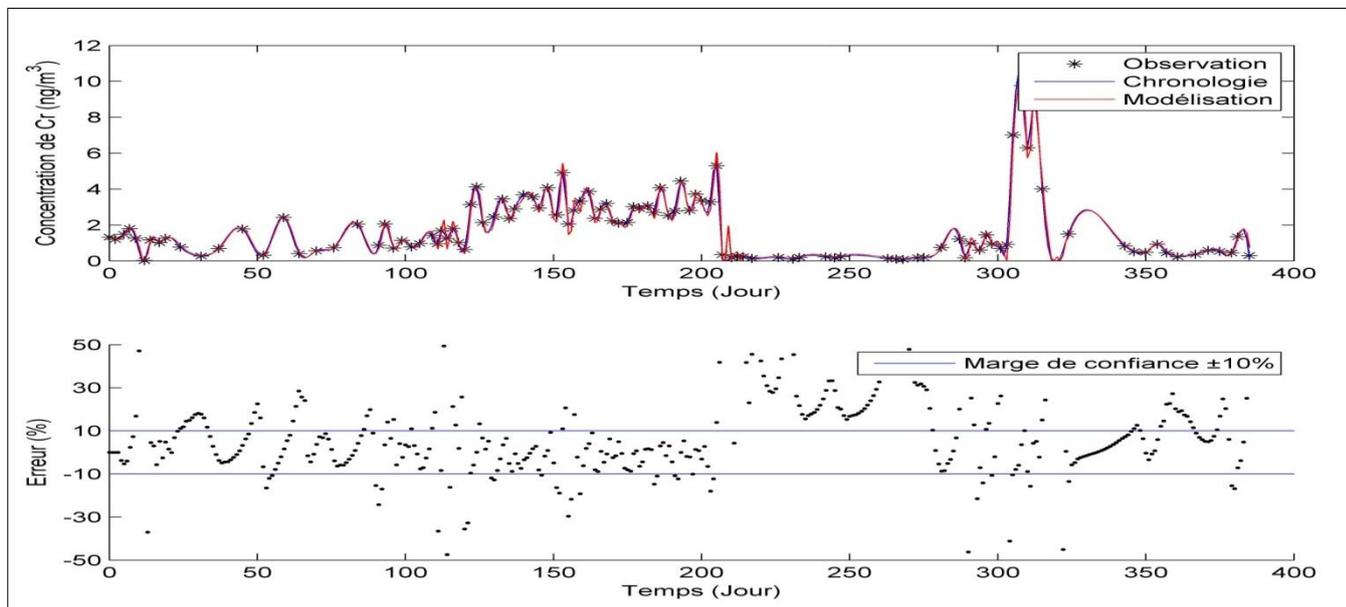


Figure V-29: Modélisation du Chrome (Cr) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
98,78	0,06568	2,326283	-2,478482	1,536809	-0,428511	54,66

V- 6- 5- Le Hafnium (Hf)

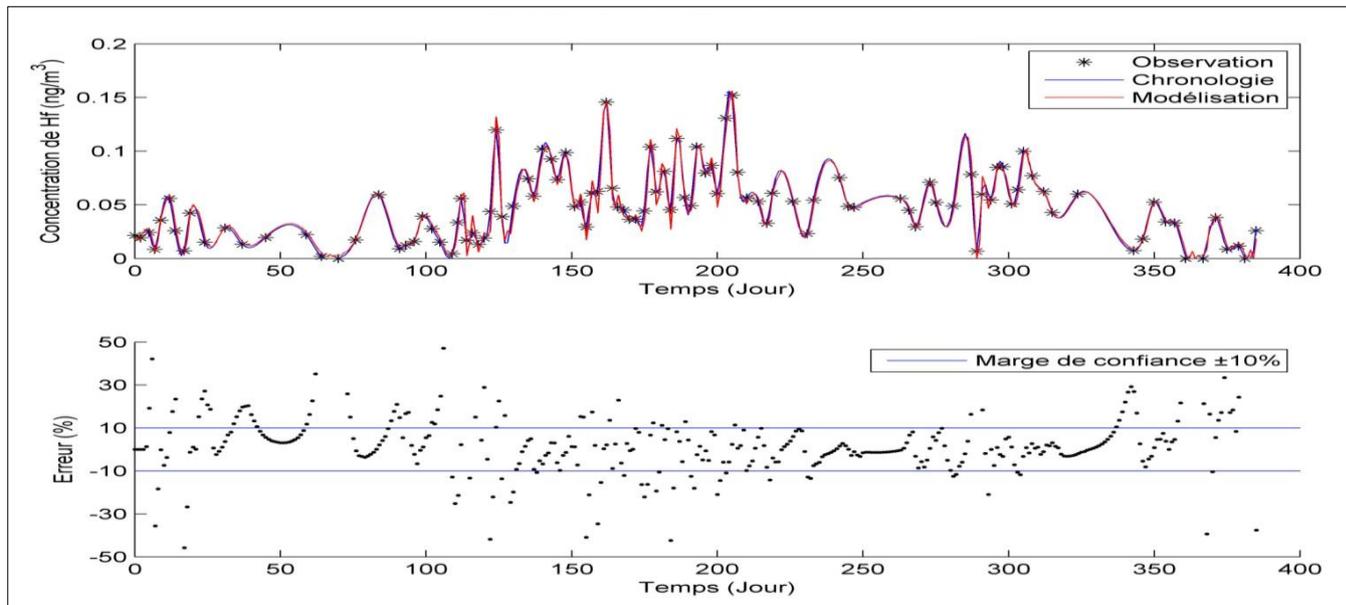


Figure V-30: Modélisation du Hafnium(Hf) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
98,44	0,002898	2,382005	-2,655912	1,716593	-0,505502	63,99

V- 6- 6- Le Lanthane (La)

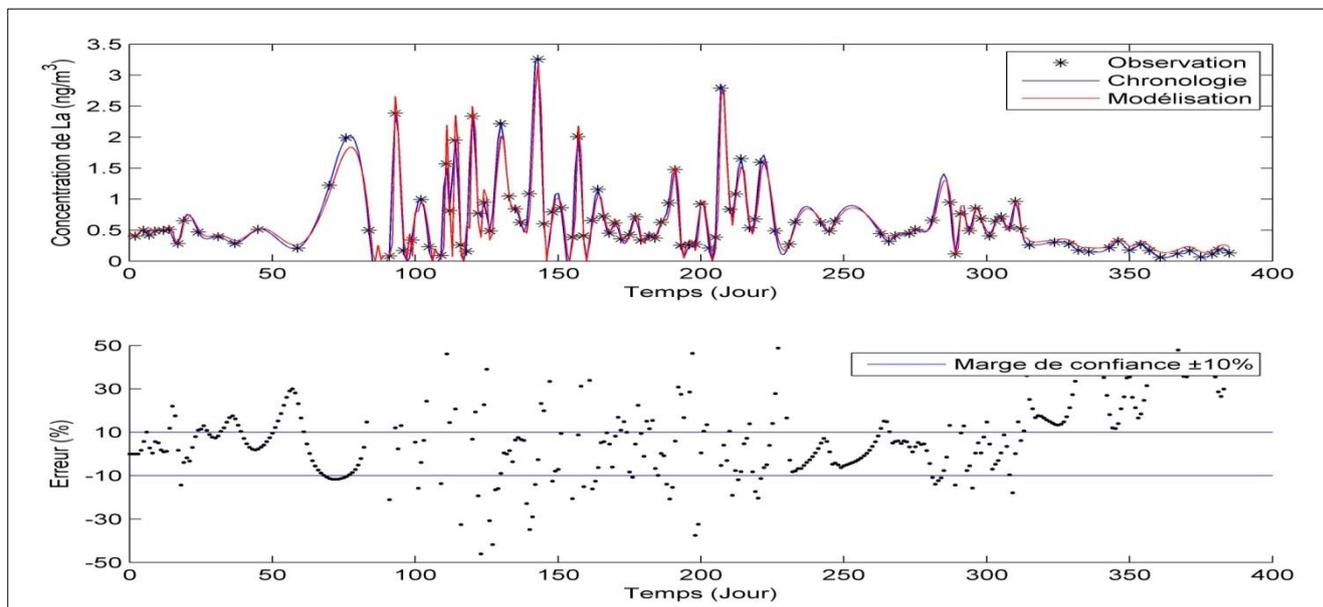


Figure V-31: Modélisation du Lanthane(La) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
94,56	0,08562	1,881099	-1,717582	0,880293	-0,180507	45,60

V- 6- 7- Le Sodium (Na)

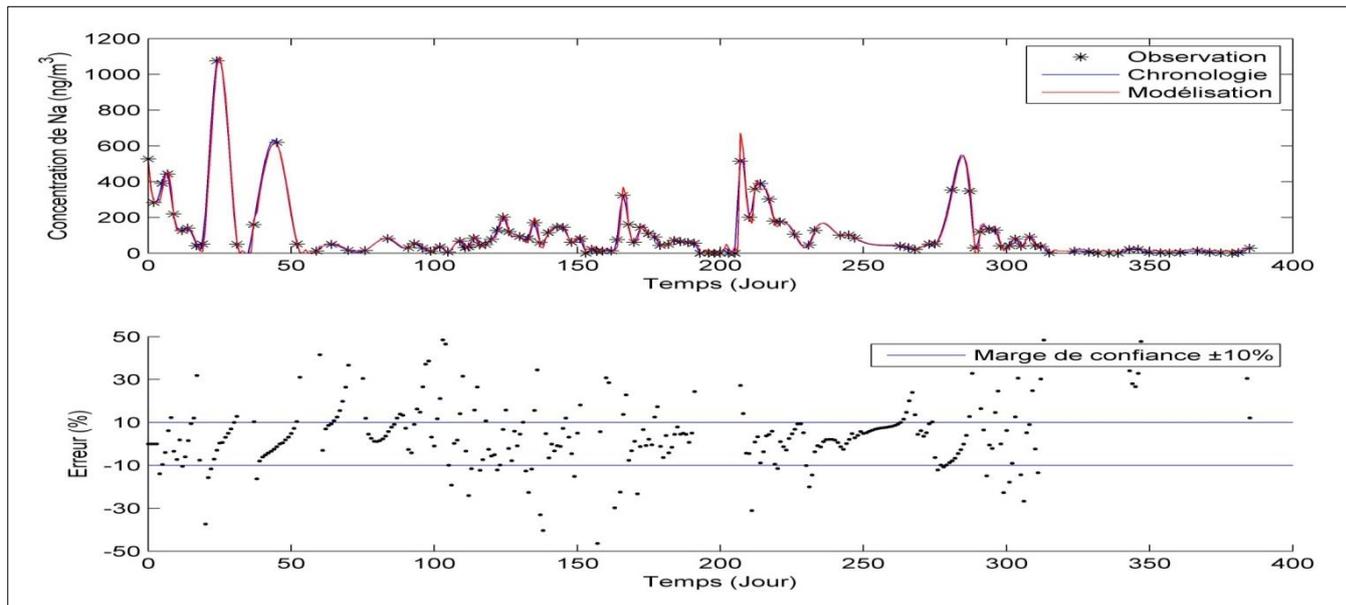


Figure V-32: Modélisation du Sodium(Na) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
99,04	5,556142	2,342561	-2,341002	1,295967	-0,348612	47,67

V 6- 8- L'Antimoine (Sb)

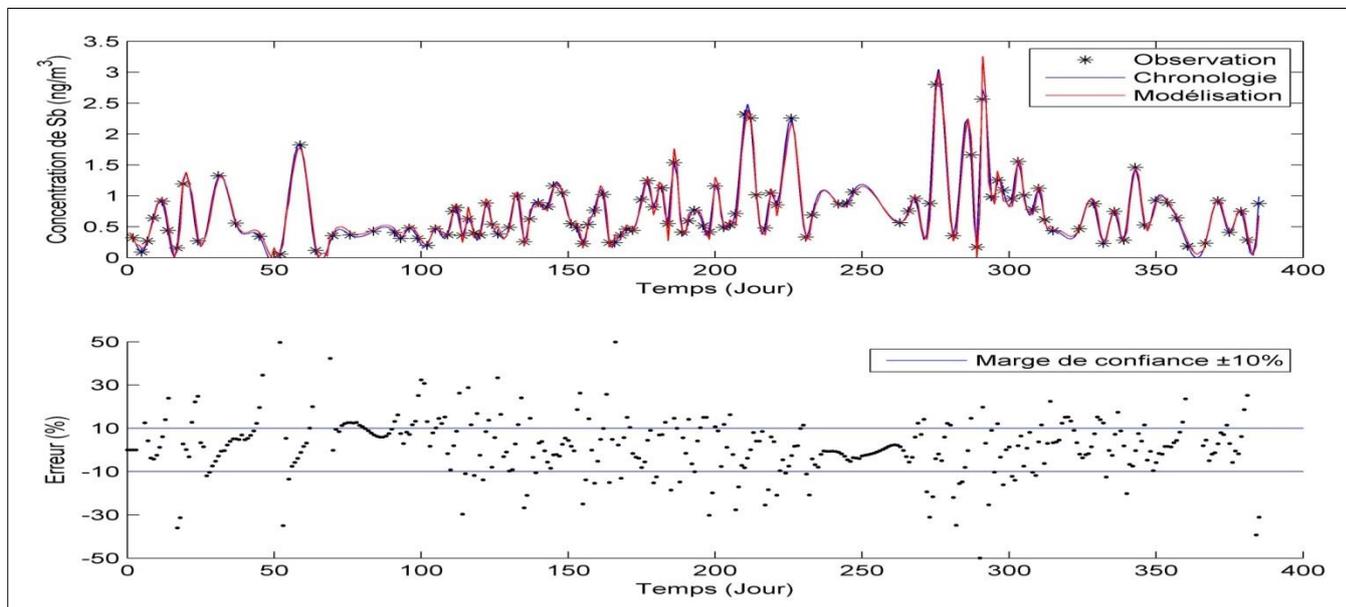


Figure V-33: Modélisation de l'Antimoine(Sb) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
98,13	0,079158	2,408354	-2,739824	1,734286	-0,507948	61,92

V- 6- 9- Le Scandium(Sc)

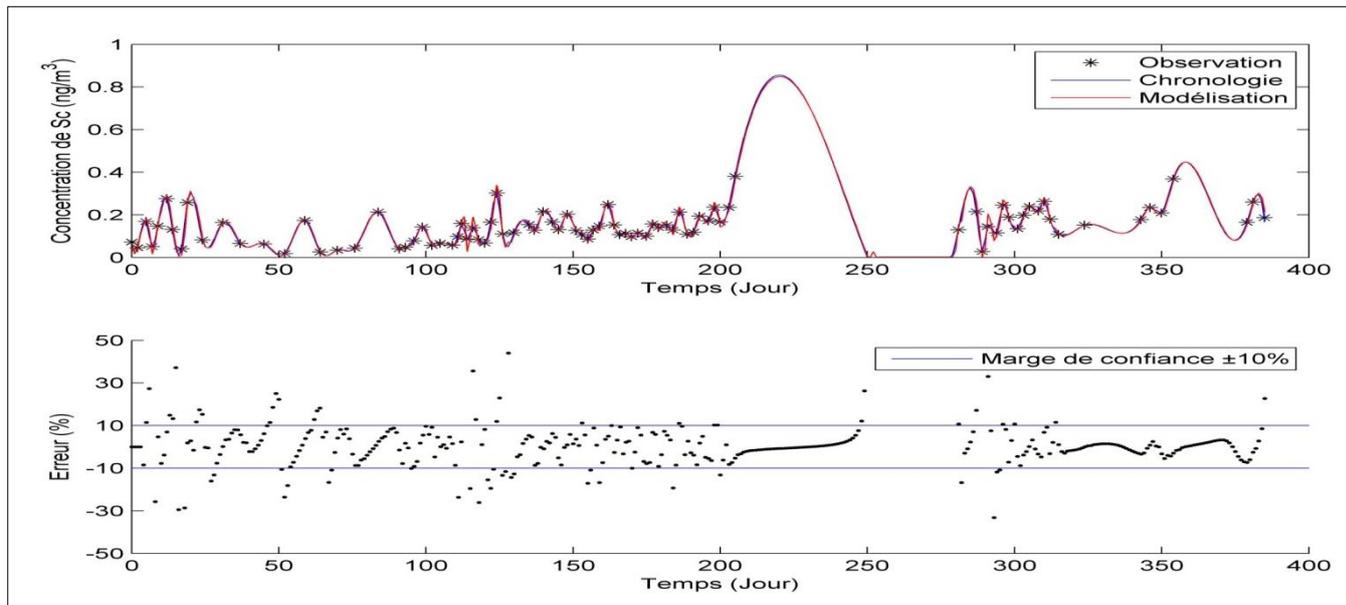


Figure V-34: Modélisation du Scandium (Sc) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
99,76	0,00212	2,591033	-2,905692	1,793374	-0,490359	76,68

V- 6- 10- Le Samarium(Sm)

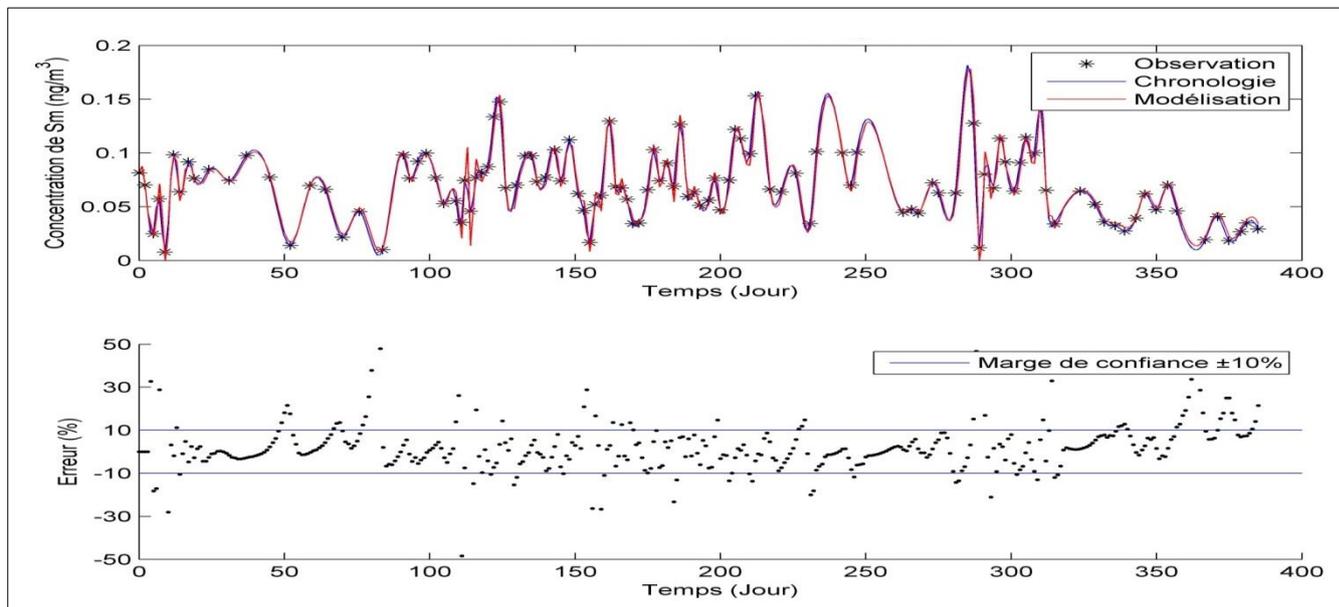


Figure V-35: Modélisation du Samarium (Sm) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
98,22	0,005785	2,333539	-2,57691	1,697029	-0,538025	78,50

V- 6- 11- L'Ytterbium (Yb)

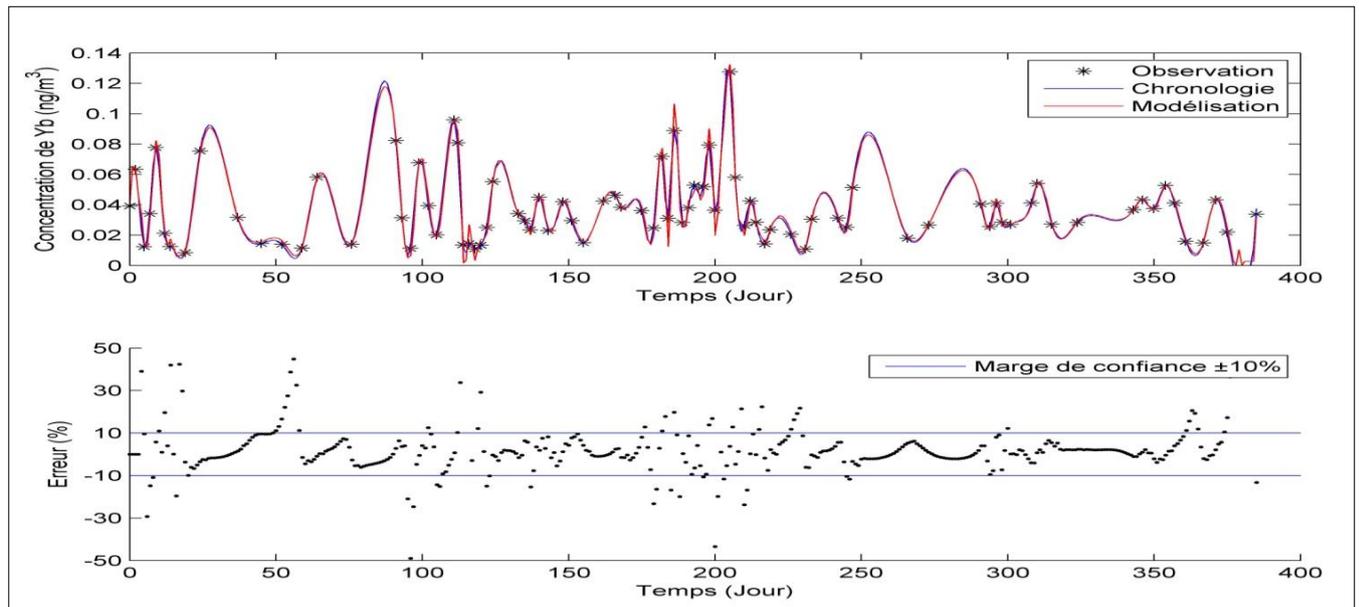


Figure V-36: Modélisation de l'Ytterbium (Yb) par le Modèle ARMA.

R^2 (%)	C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	VCDME (%)
99,02	0,002722	2,581994	-3,011147	1,938481	-0,578584	81,09

V- 6- 12- Résumé de la modélisation par le modèle ARMA

Tableau V-5: Résumé de la modélisation par le modèle ARMA.

Eléments	R^2 (%)	V.C.D.M.E. (%)	Coefficients du modèle				
			C^{ts}	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)
TSP	98,3	84,97	3,39512	2,454984	-2,836557	1,861202	-0,578551
Yb	99,02	81,09	0,002722	2,581994	-3,011147	1,938481	-0,578584
Br	99,14	79,02	0,076318	2,454034	-2,794578	1,843777	-0,533579
Sm	98,22	78,5	0,005785	2,333539	-2,57691	1,697029	-0,538025
Sc	99,76	76,68	0,00212	2,591033	-2,905692	1,793374	-0,490359
Ce	97,02	68,13	0,119304	2,189396	-2,317003	1,382718	-0,345543
Hf	98,44	63,99	0,002898	2,382005	-2,655912	1,716593	-0,505502
Sb	98,13	61,92	0,079158	2,408354	-2,739824	1,734286	-0,507948
Cr	98,78	54,66	0,06568	2,326283	-2,478482	1,536809	-0,428511
Na	99,04	47,67	5,556142	2,342561	-2,341002	1,295967	-0,348612
La	94,56	45,6	0,08562	1,881099	-1,717582	0,880293	-0,180507

Nous avons gardé 06 chiffres après la virgule car le modèle ARMA est un modèle récurant ce qui fait que la précision sur les constantes du modèle ($AR_{(i)}$) est capitale vu que la fiabilité du modèle résulte en cette dernière.

Le coefficient de régression (R^2) de la modélisation par le modèle ARMA a été acceptable sauf que le deuxième critère de validation (VCDME) était relativement faible. Le modèle ARMA était plus précis que la méthode LED.

V- 7- Modélisation par les réseaux de neurones

V- 7- 1- Les TSP

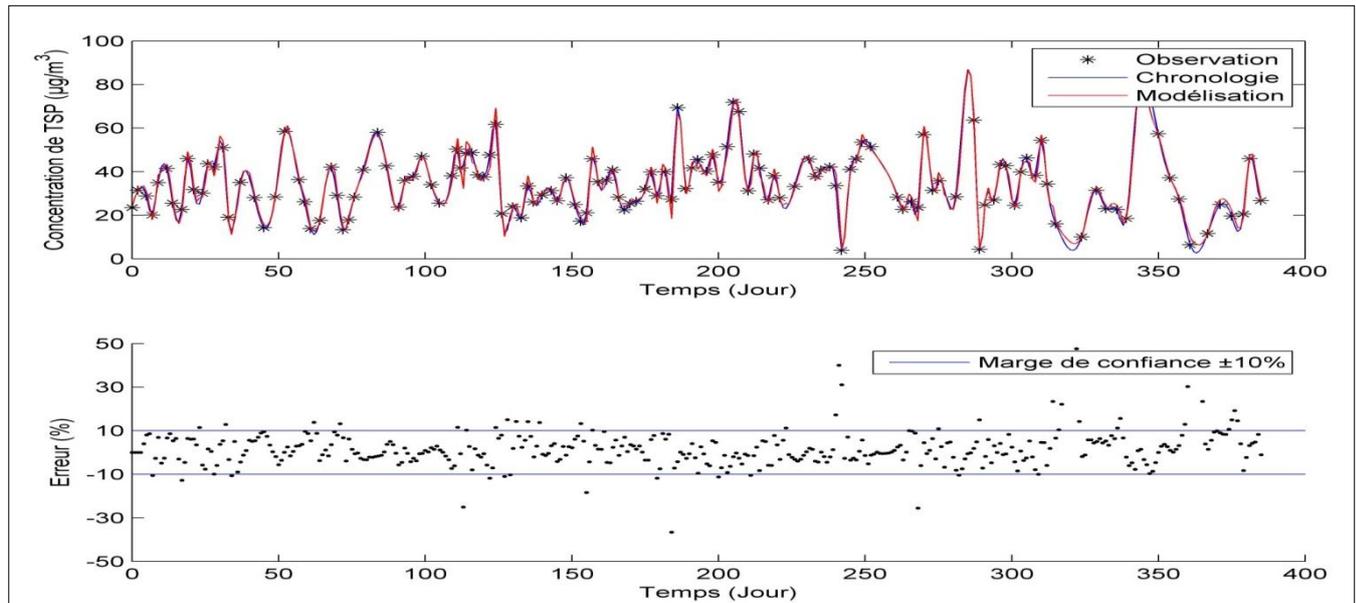


Figure V-37: Modélisation des TSP par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithme	R^2 (%)	Itérations	R^2 (%)	R^2	VCDME
[40-1]	L-P	LM-BR	98,59	215	99,26	98,96	88,6

V- 7- 2- Le Brome (Br)

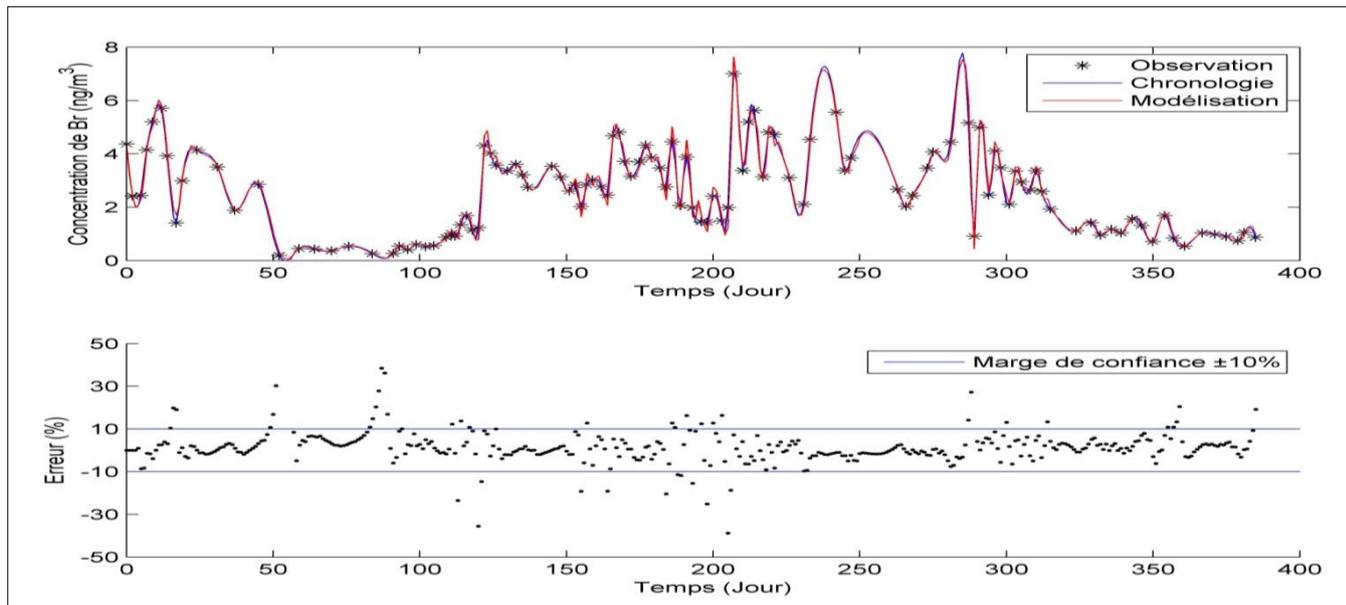


Figure V-38: Modélisation du Brome (Br) par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithmme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[2-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,39	161	98,43	88,6	99,49

V- 7- 3- Le Cérium (Ce)

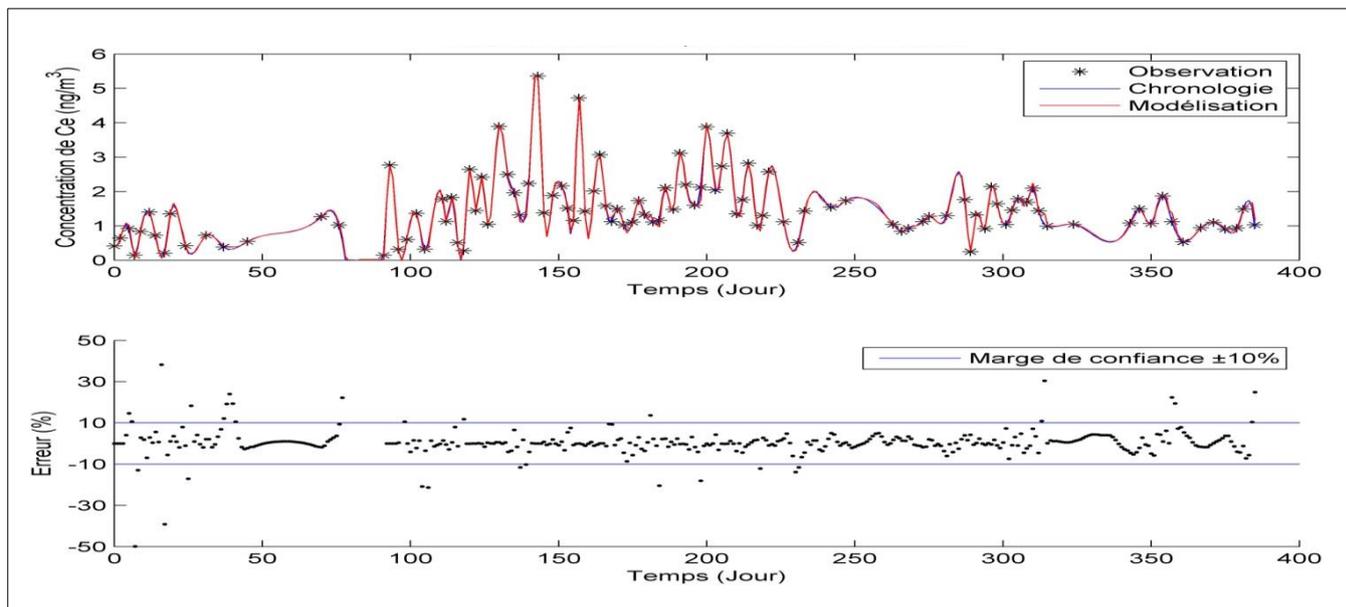


Figure V-39: Modélisation du Cérium(Ce) par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithmme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,68	1265	95,63	89,12	99,78

V- 7- 4- Le Chrome (Cr)

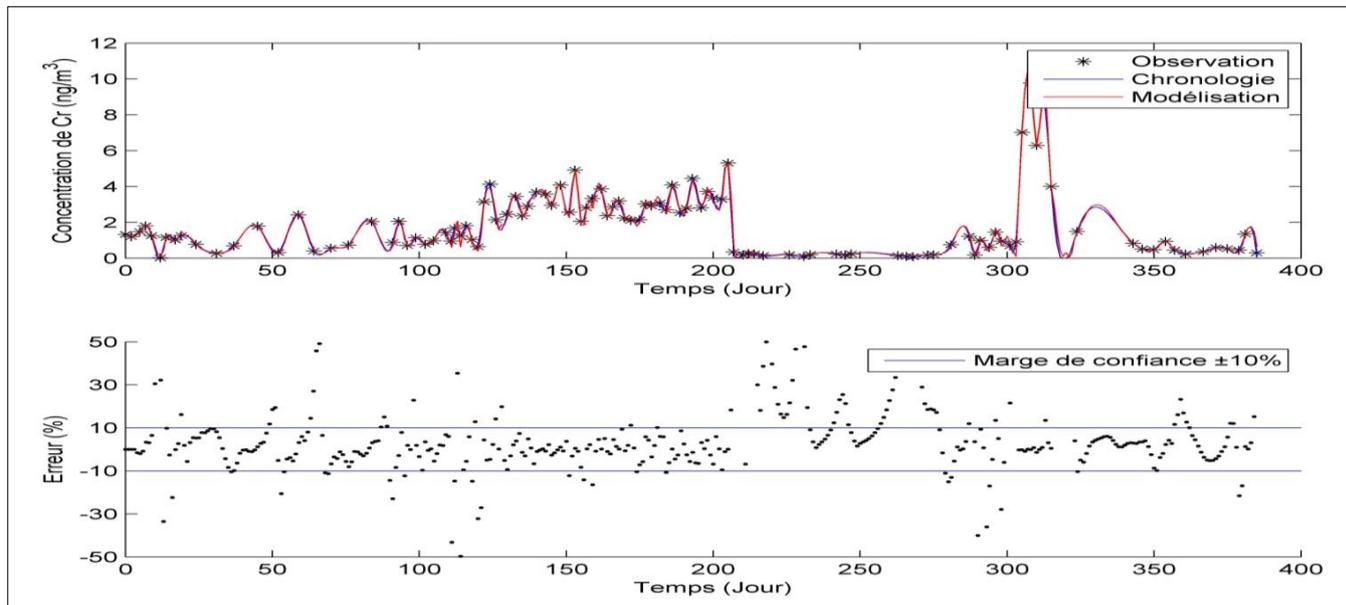


Figure V-40: Modélisation du Chrome(Cr) par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[5-10-2-1]	L-L-L-P	LM-BR	99,31	1132	98,46	69,17	99,54

V- 7- 5- Le Hafnium (Hf)

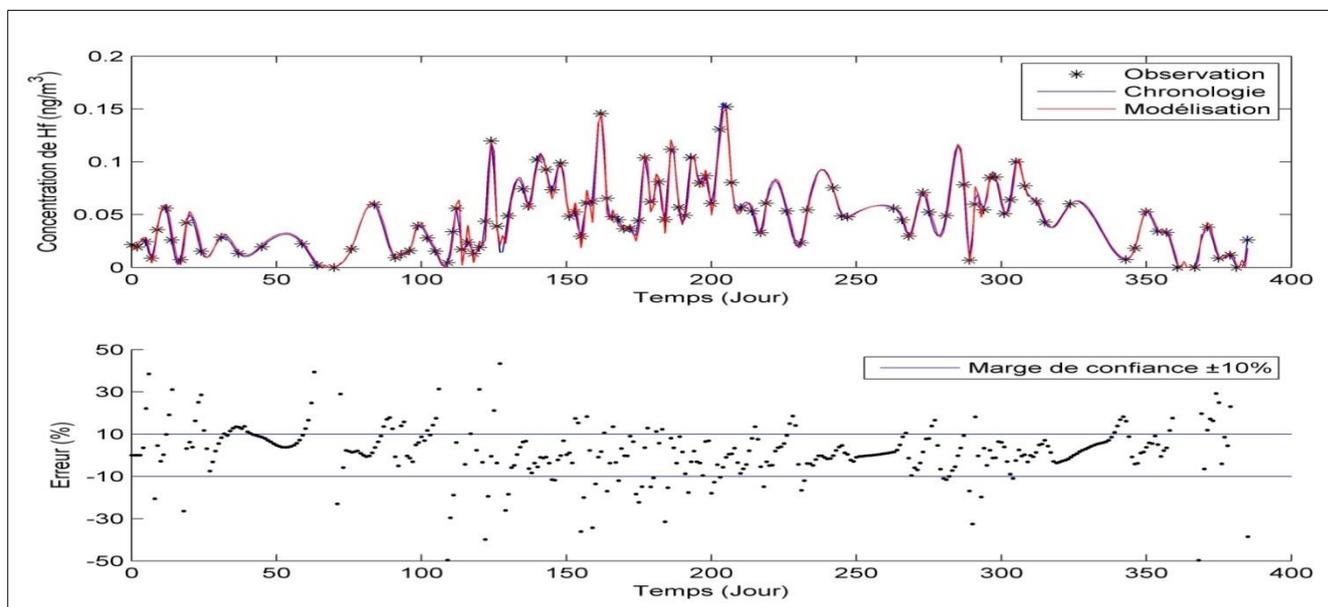


Figure V-41: Modélisation du Hafnium(Hf) par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[2-2-1]	L-L-P	LM-BR	97	760	98,11	66,58	98,65

V- 7- 6- Le Lanthane (La)

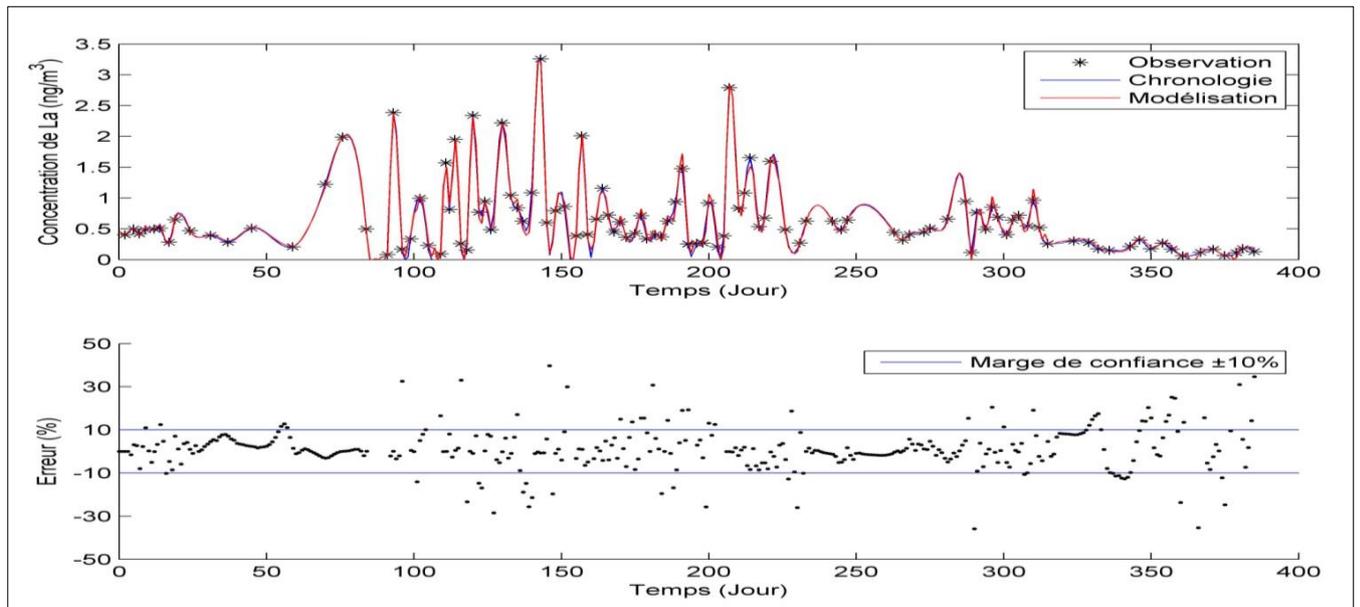


Figure V-42: Modélisation du Lanthane(La) par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[5-10-2-1]	L-L-L-P	LM-BR	99,47	321	89,85	74,35	99,52

V- 7- 7- Le Sodium (Na)

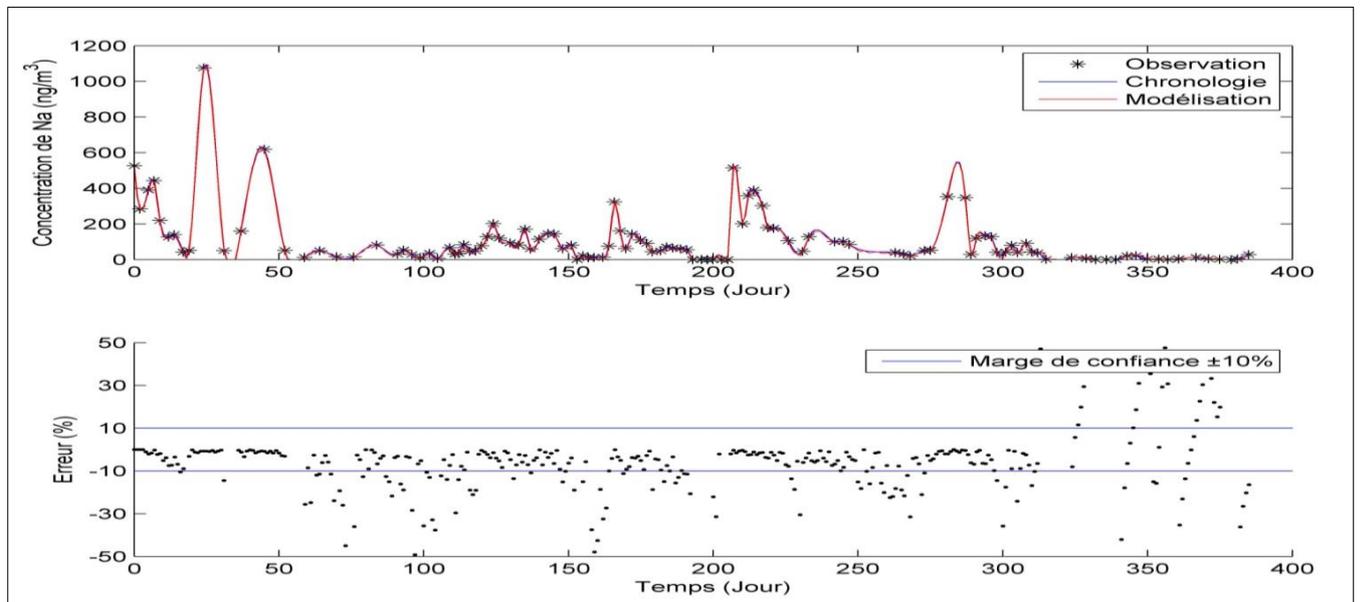


Figure V-43: Modélisation du Sodium(Na) par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[5-1]	T-P	LM-BR	60,4	146	86,35	57,25	99,97

V- 7- 8- L'Antimoine (Sb)

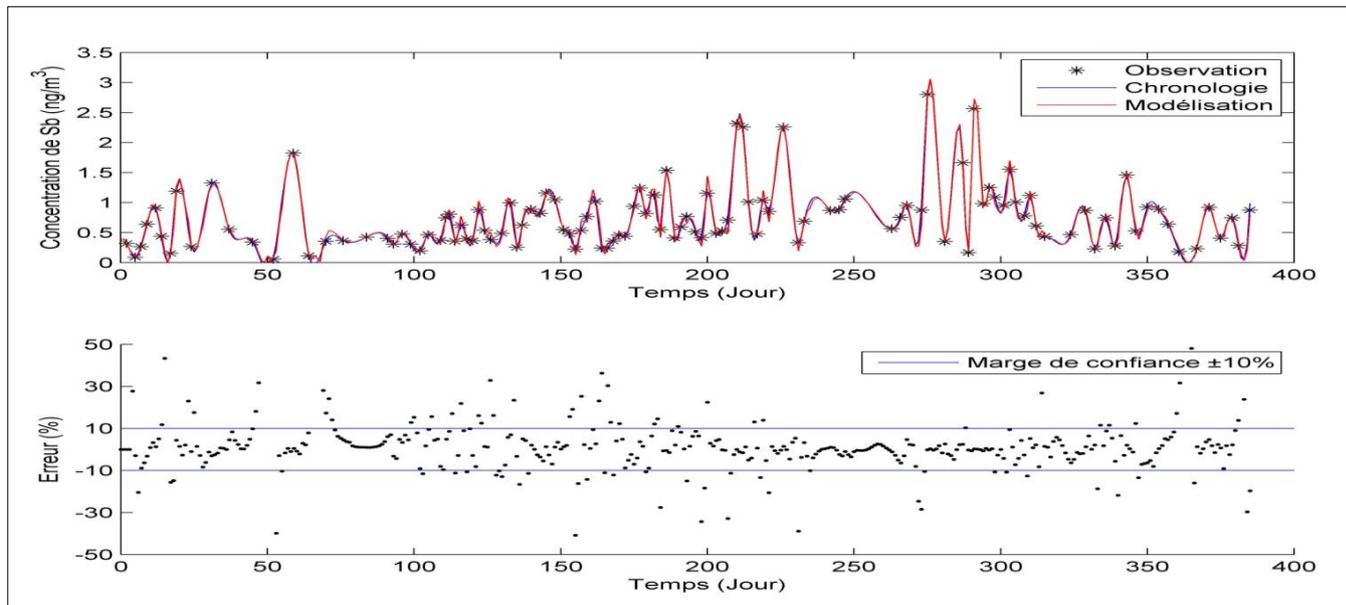


Figure V-44: Modélisation de l'Antimoine(Sb) par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,37	423	97,92	76,68	99,39

V- 7- 9- Le Scandium (Sc)

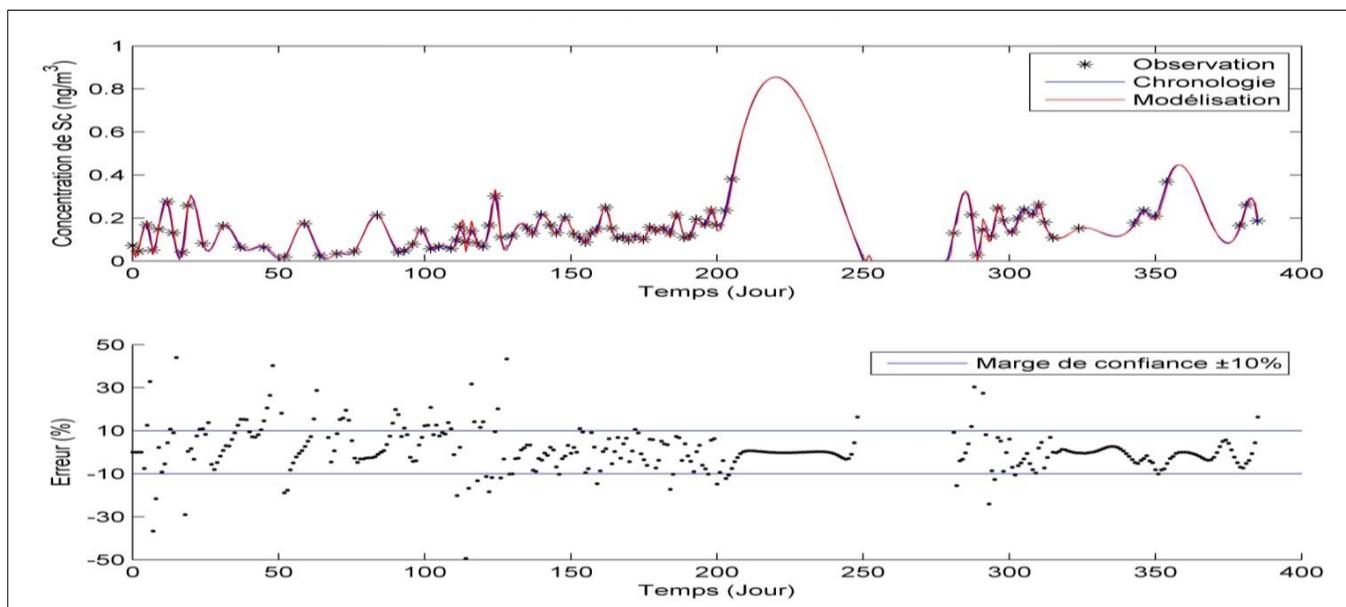


Figure V-45: Modélisation du Scandium(Sc) par les réseaux de neurones.

Apprentissage					Test	Modélisation (%)	
Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[5-10-2-1]	L-L-L-P	LM-BR	99,59	554	99,47	73,83	99,79

V- 7- 10- Le Samarium (Sm)

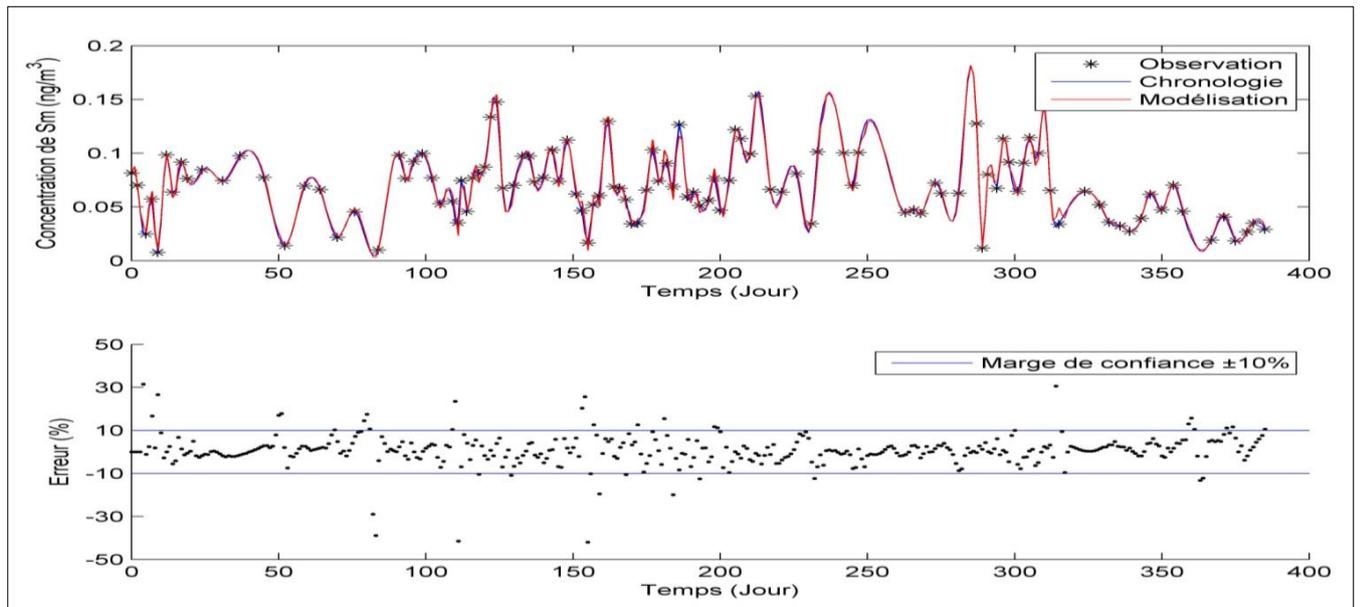


Figure V-46: Modélisation du Samarium(Sm) par les réseaux de neurones.

Apprentissage				Test	Modélisation (%)		
Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,37	2172	97,84	91,96	99,45

V- 7- 11- L'Ytterbium (Yb)

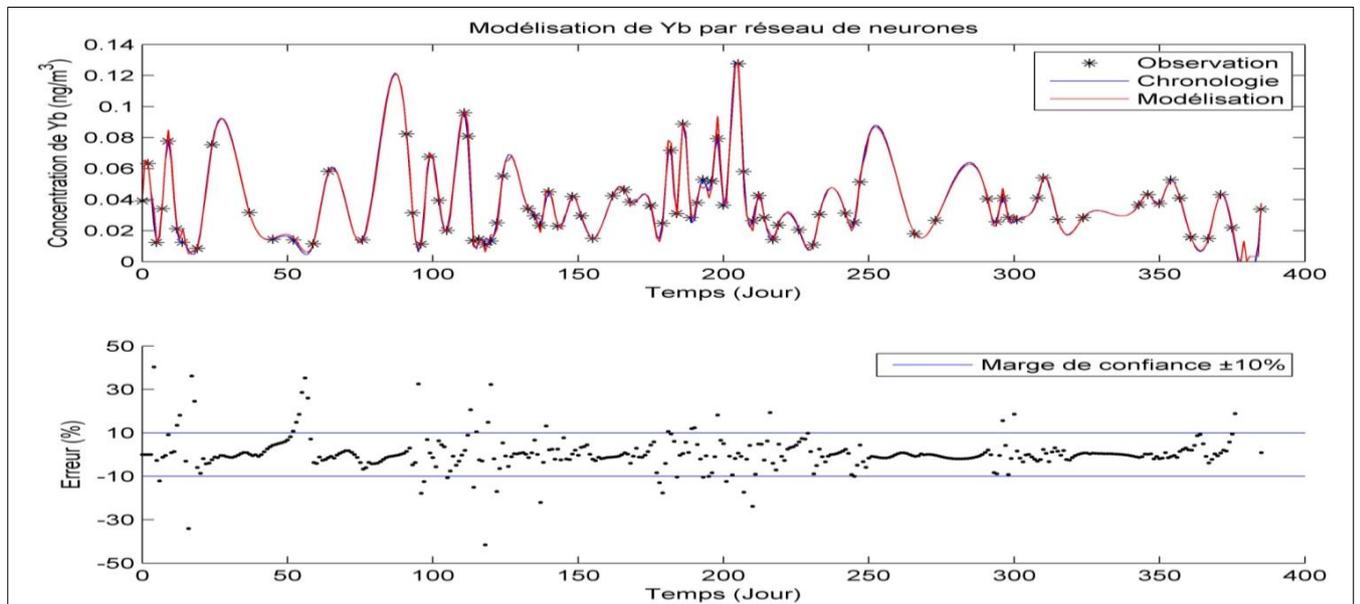


Figure V-47: Modélisation de l'Ytterbium(Yb) par les réseaux de neurones.

Apprentissage				Test	Modélisation (%)		
Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)	R ²	VCDME
[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	97,17	126	97,97	88,6	99,57

V- 7- 12- Résumé de la modélisation par les réseaux de neurones

Tableau V-6: Résumé de la modélisation par les réseaux de neurones.

Elément	Apprentissage			Test	Modélisation (%)		
	Architecture	Algorithme	Itérations	R ² (%)	R ² (%)	R ²	VCDME
Sm	[10-2-1]	LM-BR	2172	99,37	97,84	99,45	91,96
Ce	[10-2-1]	LM-BR	1265	99,68	95,63	99,78	89,12
TSP	[40-1]	LM-BR	215	98,59	99,52	98,96	88,6
Br	[2-2-1]	LM-BR	161	99,39	98,43	99,49	88,6
Yb	[10-2-1]	LM-BR	126	97,17	97,97	99,57	88,6
Sb	[10-2-1]	LM-BR	423	99,37	97,92	99,39	76,68
La	[5-10-2-1]	LM-BR	321	99,47	89,85	99,52	74,35
Sc	[5-10-2-1]	LM-BR	554	99,59	99,47	99,79	73,83
Cr	[5-10-2-1]	LM-BR	1132	99,31	98,46	99,54	69,17
Hf	[5-10-2-1]	LM-BR	1132	99,31	98,46	98,65	69,17
Na	[5-1]	LM-BR	146	60,4	86,35	99,97	57,25

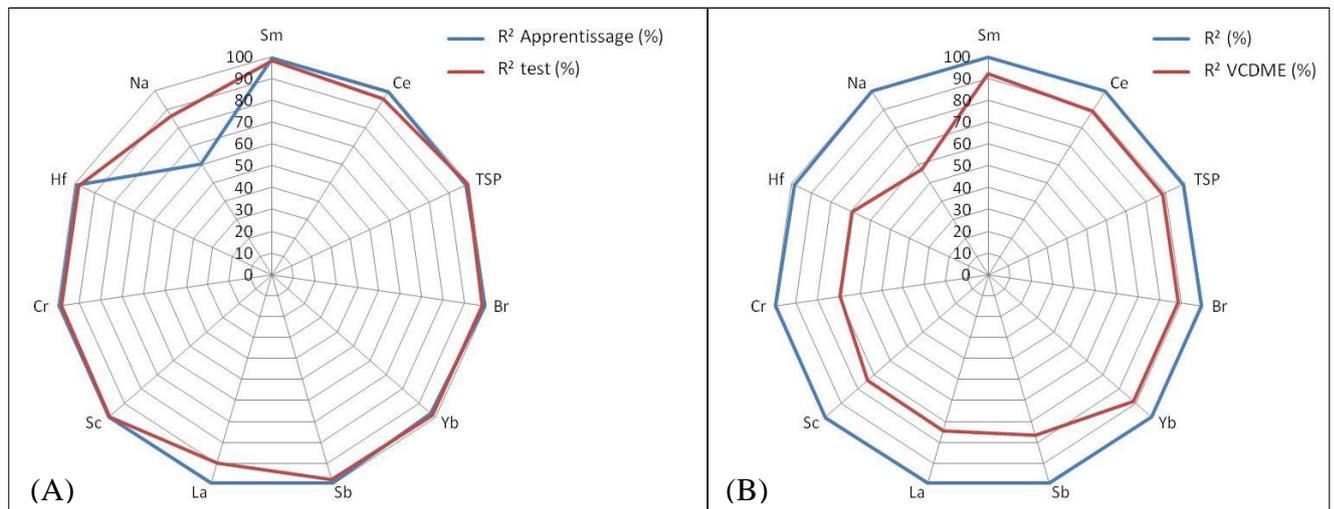


Figure V-48: Résumé de la modélisation par les réseaux de neurones, (A) phase d'apprentissage, (B) la modélisation.

On remarque que le test de validation du réseau de neurones élaboré pour le lanthane (La) et le sodium (Na) était faible (89,85% pour le La et 86,35% pour le Na) par rapport aux autres éléments, cela s'explique par le sur-apprentissage du réseau de neurones de ces deux éléments.

Les deux critères de validation de la modélisation ont été explicatifs. Concernant le Sodium (Na), son modèle n'était pas très explicatif car l'architecture n'était pas convenable et qu'il y avait un sur-apprentissage de cet élément.

V- 8- Comparaison entre les résultats de modélisation par les trois méthodes

Tableau V-7: Comparaison entre les résultats obtenus par les trois méthodes de modélisation.

Elément	R^2 (%)			VCDME (%)		
	Méthode			Méthode		
	LED	ARMA	RN	LED	ARMA	RN
Sm	98,86	98,22	99,45	71,24	78,5	91,96
Ce	98,68	97,02	99,78	68,13	68,13	89,12
TSP	98,87	98,3	98,96	69,17	84,97	88,6
Yb	99,06	99,02	99,57	59,06	81,09	88,6
Br	99,13	99,14	99,49	77,46	79,02	88,6
Sb	98,84	98,13	99,39	55,96	61,92	76,68
La	98,97	94,56	99,52	59,59	45,6	74,35
Sc	99,55	99,76	99,79	63,99	76,68	73,83
Hf	98,85	98,44	98,65	58,03	63,99	69,17
Cr	99,32	98,78	99,54	66,32	54,66	69,17
Na	99,36	99,04	99,97	47,93	47,67	57,25

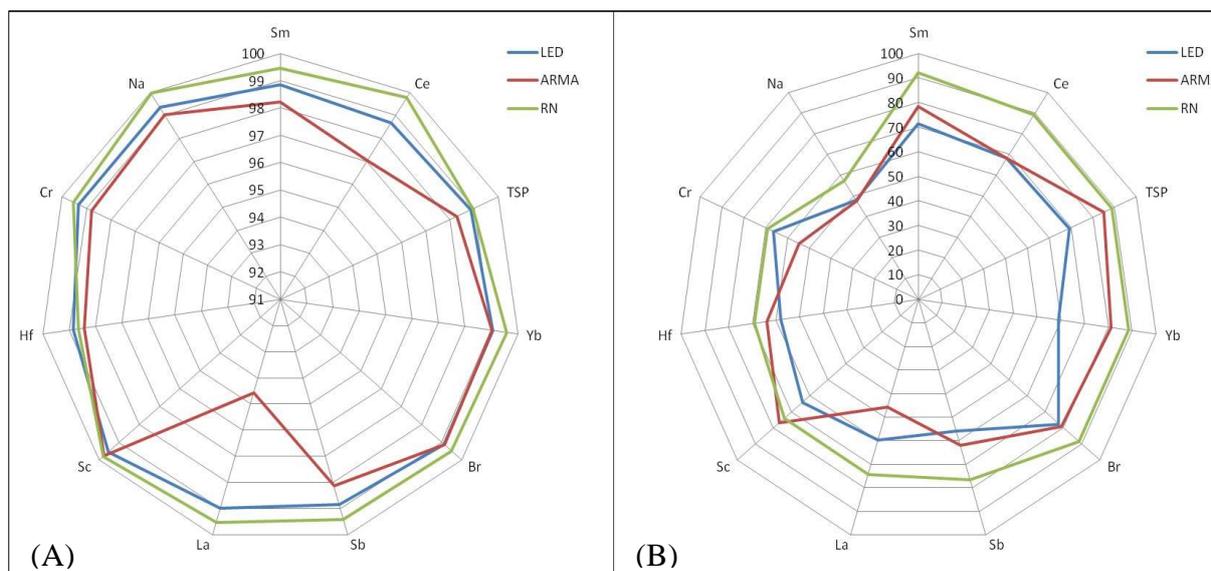


Figure V-49: Comparaison entre les trois méthodes de modélisation. (A) le coefficient de détermination, (B) le VCDME.

La comparaison entre les trois méthodes de modélisation utilisées nous constatons que la modélisation par les réseaux de neurones a donné les meilleurs résultats en termes de fiabilité (superposition des concentrations réelles avec celles modélisées ' R^2 ') et de précision (l'éloignement de la valeur modélisée de la valeur réelle ' $VCDME$ ').

V- 9- La Prévision de TSP et des ETM associés

Après l'élaboration et la validation de la modélisation des TSP et des ETM associés, nous avons procédé à la prévision de ces derniers, l'intérêt pratique de cette prévision c'est d'estimer la pollution *quotidienne* en TSP et en ETM associé au niveau de notre site d'étude (Drarïa) en effectuant que deux prélèvements par semaine et sans analyser le filtre de prélèvement.

V- 9- 1- Prévision des TSP

Après la modélisation des TSP, nous avons procédé à la prévision de ces derniers, l'intérêt pratique de cette prévision c'est d'estimer la pollution *quotidienne* en TSP au niveau de notre site d'étude (Drarïa) en effectuant que deux prélèvements par semaine. Cette prévision a été réalisée par les réseaux de neurones, l'architecture des réseaux est la suivante :

Tableau V-8: Réseaux de neurones de la prévision des TSP.

Jours	Apprentissage			Test	
	Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	R ² (%)
J	[40-2-1]	T-T-P	LM-BR	98,12	99,52
J+1	[40-2-1]	T-T-P	LM-BR	98,32	99,64
J+2	[40-2-1]	T-T-P	LM-BR	97,52	99,23
J+3	[40-2-1]	T-T-P	LM-BR	98,31	99
J+4	[35-5-1]	T-T-P	LM-BR	94,68	96,39

V- 9- 2- Détermination des ETM à partir des TSP

En se basant que sur la modélisation des TSP, nous avons procédé à la modélisation des ETM qu'à partir des TSP. Cette prévision a été réalisée par les réseaux de neurones, l'architecture des réseaux était la suivante :

Tableau V-9: Réseaux de neurones de la prévision des ETM à partir des TSP.

Eléments	Apprentissage			Test	
	Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	R ² (%)
La	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,37	99,73
Na	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,54	99,39
Br	[5-10-2-1]	L-L-L-P	LM-BR	99,69	98,81
Sb	[5-10-2-1]	L-L-L-P	LM-BR	98,92	97,92
Sm	[4-8-2-1]	L-L-L-P	LM-BR	98,41	85
Hf	[4-12-1]	L-L-P	LM-BR	97,1	97,15
Yb	[20-15-1]	L-L-P	LM-BR	90	98,01
Sc	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	86,5	96,14
Ce	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	92,14	98,7
Cr	[4-8-2-1]	L-L-P	LM-BR	93,7	95,43

V- 9- 3- Prévision des ETM

Après l'élaboration et la validation de la modélisation des ETM associés aux TSP à partir des TSP, nous avons procédé à la prévision de ces derniers, l'intérêt pratique de cette prévision c'est d'estimer la pollution *quotidienne* en ETM associé aux TSP au niveau de notre site d'étude (Drarïa) en se basant que sur les TSP collectés deux fois par semaine. Cette prévision a été réalisée par les réseaux de neurones, l'architecture des réseaux était la suivant :

Tableau V-10: Prévision des ETM associés aux TSP.

Eléments	Apprentissage					Test	
	Jour	Architecture	Fonctions	Algorithmes	R ² (%)	Itérations	R ² (%)
Sm	J	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,04	120	98,94
	J+1	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,20	87	99,46
	J+2	[5-1]	T-P	LM-BR	99,44	53	98,67
	J+3	[8-2-1]	T-P	LM-BR	99,54	193	96,69
	J+4	[10-2-1]	T-P	LM-BR	97,43	359	96,95
Br	J	[10-2-1]	T-P	LM-BR	99,57	65	99,36
	J+1	[8-2-1]	T-P	LM-BR	99,68	752	99,19
	J+2	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,54	123	99,59
	J+3	[8-2-1]	T-P	LM-BR	99,53	87	99,06
	J+4	[2-10-1]	T-P	LM-BR	98,36	1290	97,92
La	J	[8-2-1]	T-P	LM-BR	97,24	134	55,44
	J+1	[5-2-1]	T-P	LM-BR	96,97	63	54,24
	J+2	[5-1]	T-P	LM-BR	99,06	238	97,35
	J+3	[8-2-1]	T-P	LM-BR	96,84	651	41,86
	J+4	[2-10-1]	T-P	LM-BR	96,78	1122	42,70
Na	J	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,05	98	98,48
	J+1	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,82	127	97,20
	J+2	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,28	542	96,46
	J+3	[8-2-1]	T-P	LM-BR	99,92	118	90,40
	J+4	[10-2-1]	T-P	LM-BR	98,92	189	97,45
Sb	J	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,05	871	99,18
	J+1	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,33	87	99,38
	J+2	[5-2-1]	T-P	LM-BR	99,22	153	99,16
	J+3	[8-2-1]	T-P	LM-BR	99,57	73	98,87
	J+4	[2-10-1]	T-P	LM-BR	98,00	892	97,21
Yb	J	[2-5-1]	L-L-P	LM-BR	98,29	123	99,54
	J+1	[2-10-1]	L-L-P	LM-BR	97,88	111	99,41
	J+2	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,56	89	97,75
	J+3	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,83	65	98,38
	J+4	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,21	134	96,87
Hf	J	[2-5-1]	L-L-P	LM-BR	98,41	76	99,46
	J+1	[2-10-1]	L-L-P	LM-BR	98,92	128	99,33
	J+2	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,40	78	99,07
	J+3	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,60	32	98,19
	J+4	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	97,83	198	97,96

Suite tableau V-10

Eléments	Jour	Apprentissage			Test		
		Architecture	Fonctions	Algorithme	R ² (%)	Itérations	R ² (%)
Sc	J	[2-5-1]	L-L-P	LM-BR	99,78	71	99,88
	J+1	[2-10-1]	L-L-P	LM-BR	99,83	98	99,82
	J+2	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,85	125	99,89
	J+3	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,86	87	99,71
	J+4	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,58	45	99,51
Ce	J	[2-5-1]	L-L-P	LM-BR	98,02	71	99,61
	J+1	[2-10-1]	L-L-P	LM-BR	98,20	98	99,03
	J+2	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	98,47	125	99,58
	J+3	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,90	87	99,35
	J+4	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	96,87	45	97,41
Cr	J	[2-5-1]	L-L-P	LM-BR	99,12	13	99,28
	J+1	[2-10-1]	L-L-P	LM-BR	99,45	15	98,49
	J+2	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,69	42	95,21
	J+3	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	99,40	25	99,08
	J+4	[10-2-1]	L-L-P	LM-BR	98,42	12	97,23

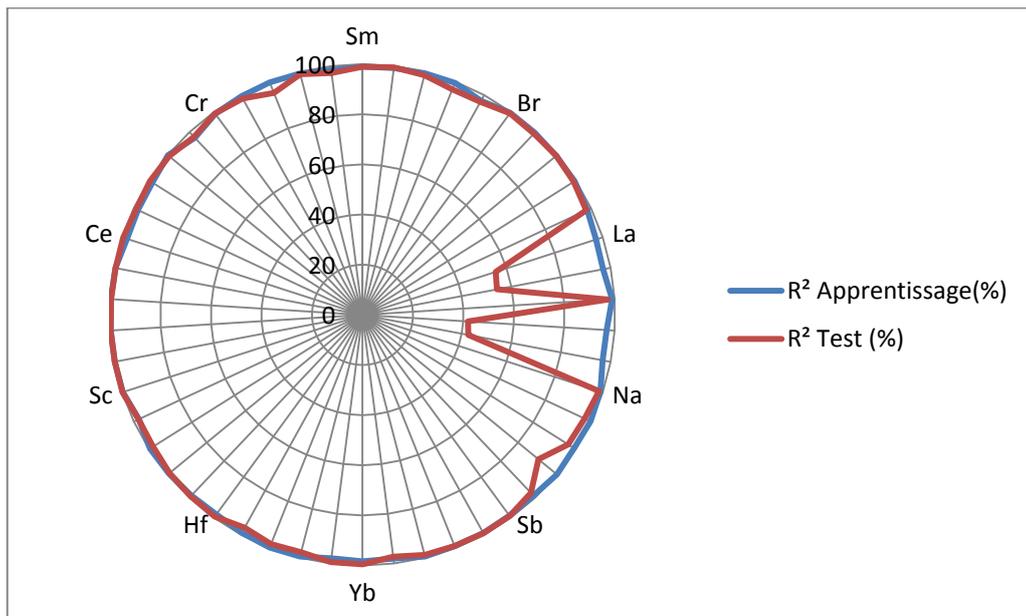


Figure V-50: Résultats de la prévision des ETM aux jours $J+i$ à partir des TSP

Les réseaux de neurones conçus pour la prévision des ETM aux jours $J+i$ à partir des TSP ont donné des résultats cohérents à l'exception du Lanthane (La).

Les faibles résultats obtenus de la phase du test de l'élément Lanthane (La) s'explique par le sur-apprentissage de son réseau de neurones ou bien par la mauvaise élaboration de l'architecture de ce réseau de neurones.

V- 10- Validation des modèles et des techniques des prévisions

La projection de nos modèles élaborés à partir des résultats d'analyse de la pollution atmosphérique au niveau de Drarïa pendant l'année 2011 sur les quatre premiers mois de l'année 2012 ont donnés les résultats suivants :

V- 10- 1- Les TSP

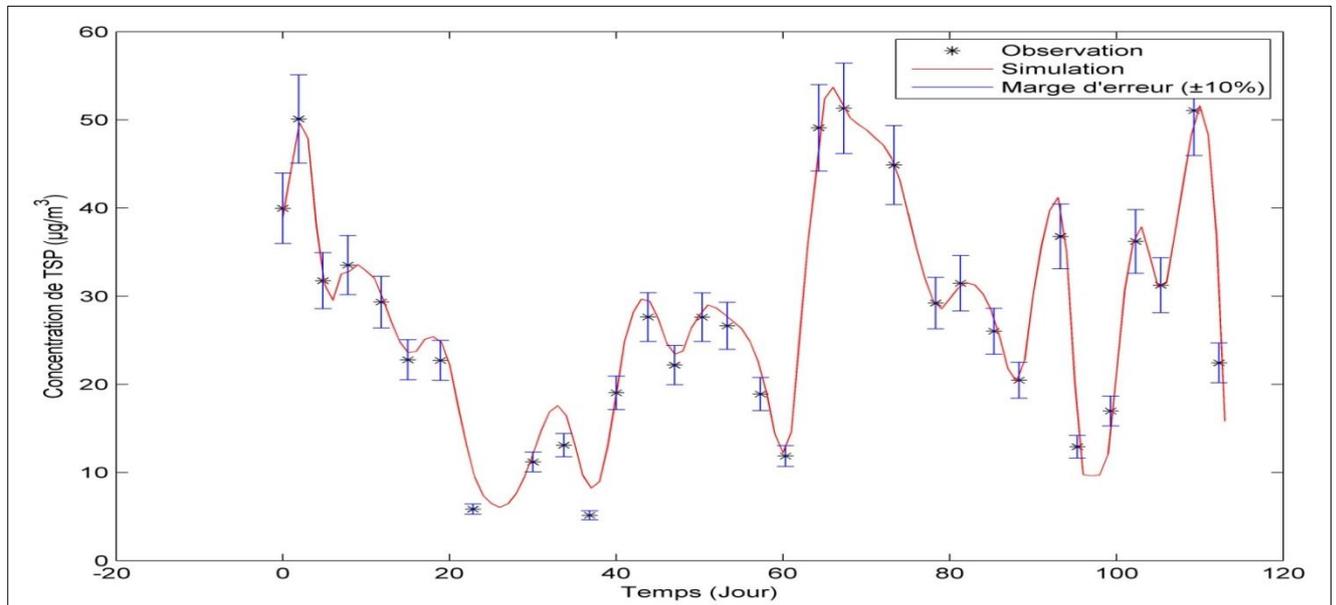


Figure V-51: Prédiction des TSP.

R^2 (%)	VCDME (%)
95,80	74,19

V- 10- 2- Le Scandium (Sc)

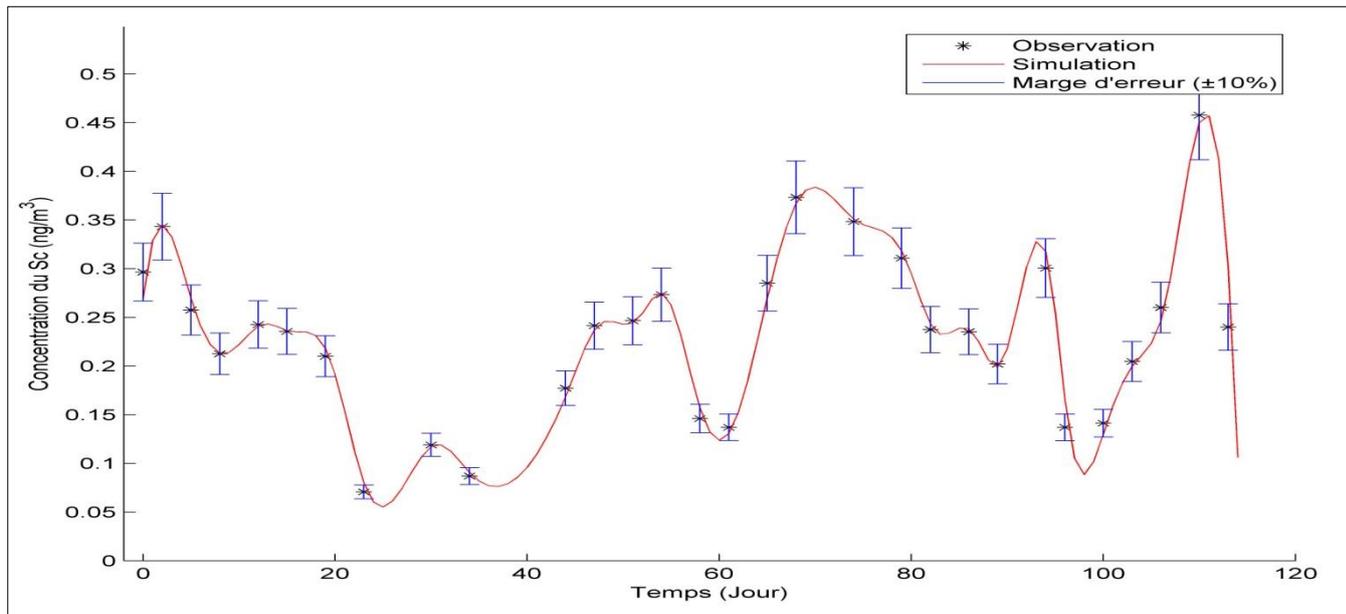


Figure V-52: Prédiction du Scandium (Sc).

R ² (%)	VCDME (%)
98,39	90

V- 10- 3- Le Brome (Br)

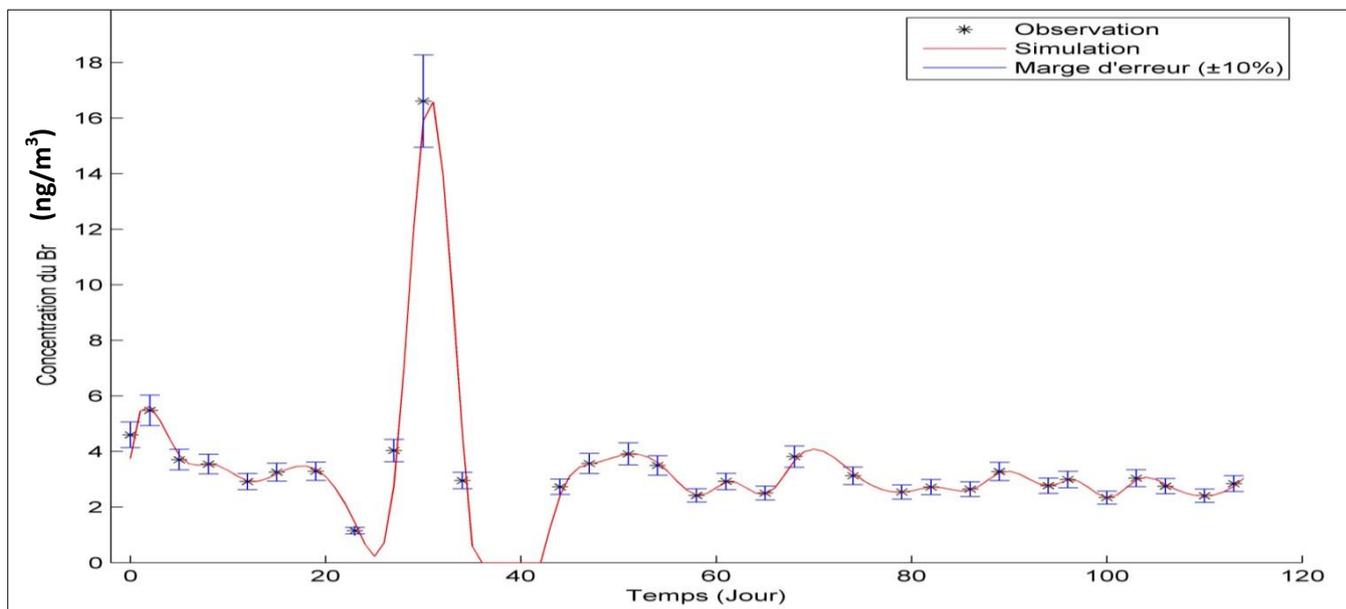


Figure V-53: Prédiction du Brome (Br).

R ² (%)	VCDME (%)
98,54	83.87

V- 10- 4- Le Samarium (Sm)

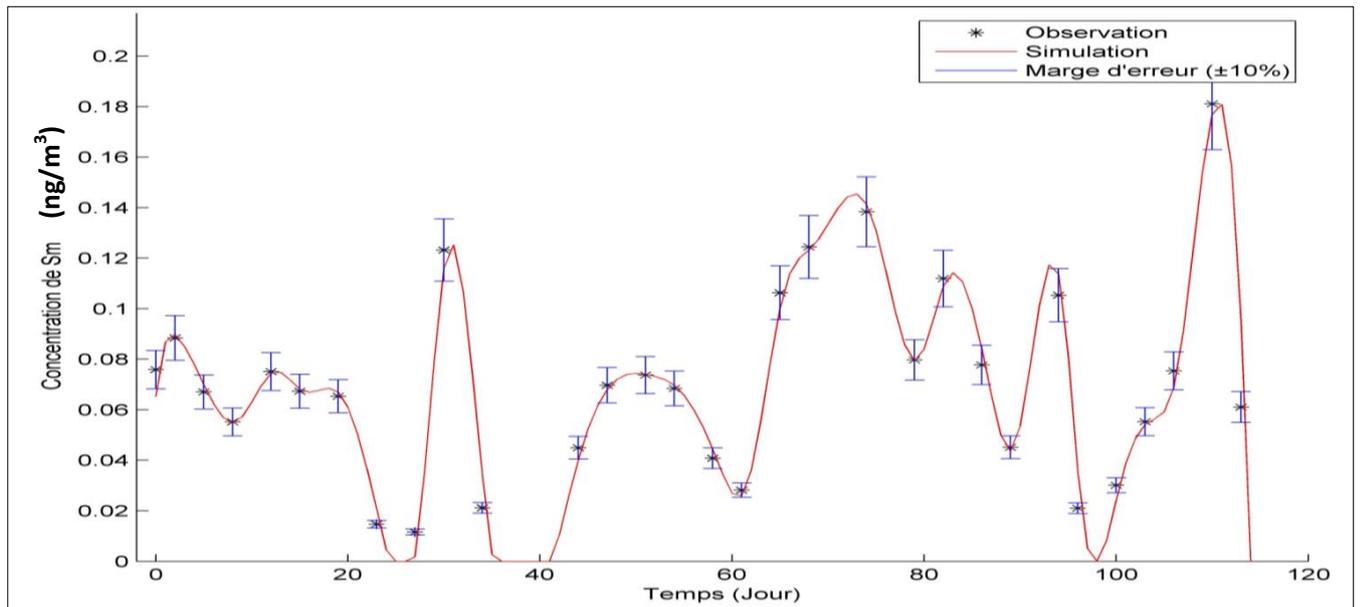


Figure V-54: Prédiction du Samarium (Sm).

R^2 (%)	VCDME (%)
97,61	77,42

V- 10- 5- Le Lanthane (La)

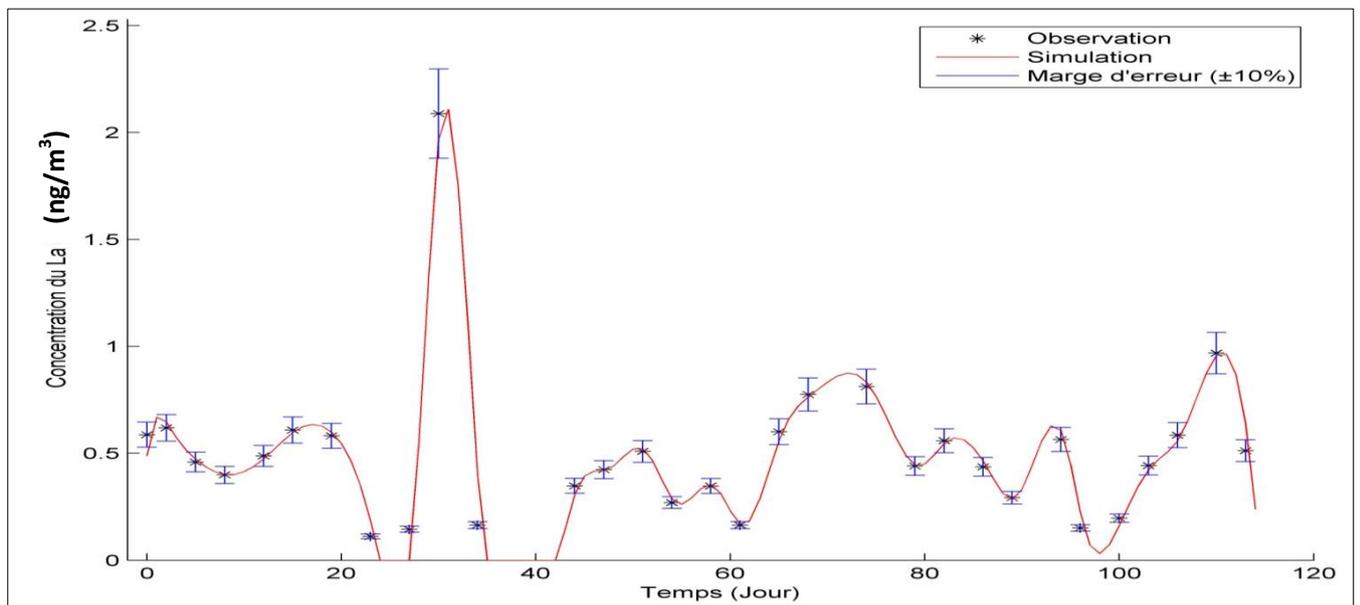


Figure V-55: Prédiction du Lanthane (La).

R^2 (%)	VCDME (%)
98,25	74,19

V- 10- 6- Le Sodium (Na)

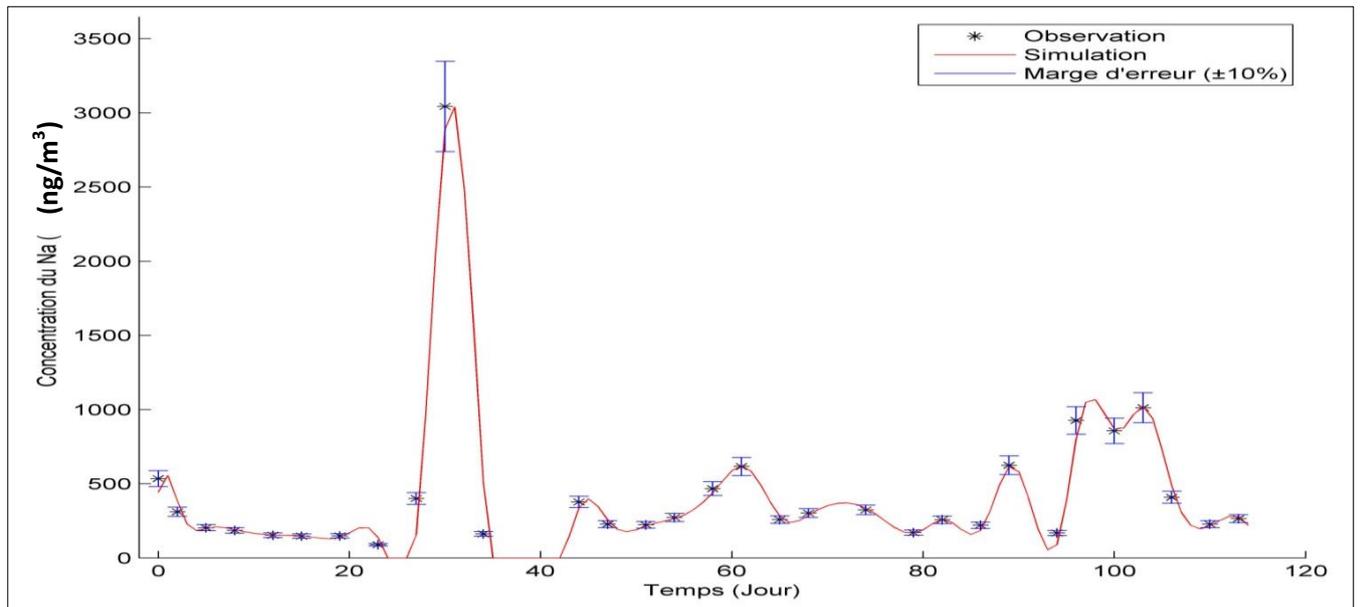


Figure V-56: Prédiction du Sodium (Na).

R^2 (%)	VCDME (%)
98,63	67,74

V- 10- 7- L'Antimoine (Sb)

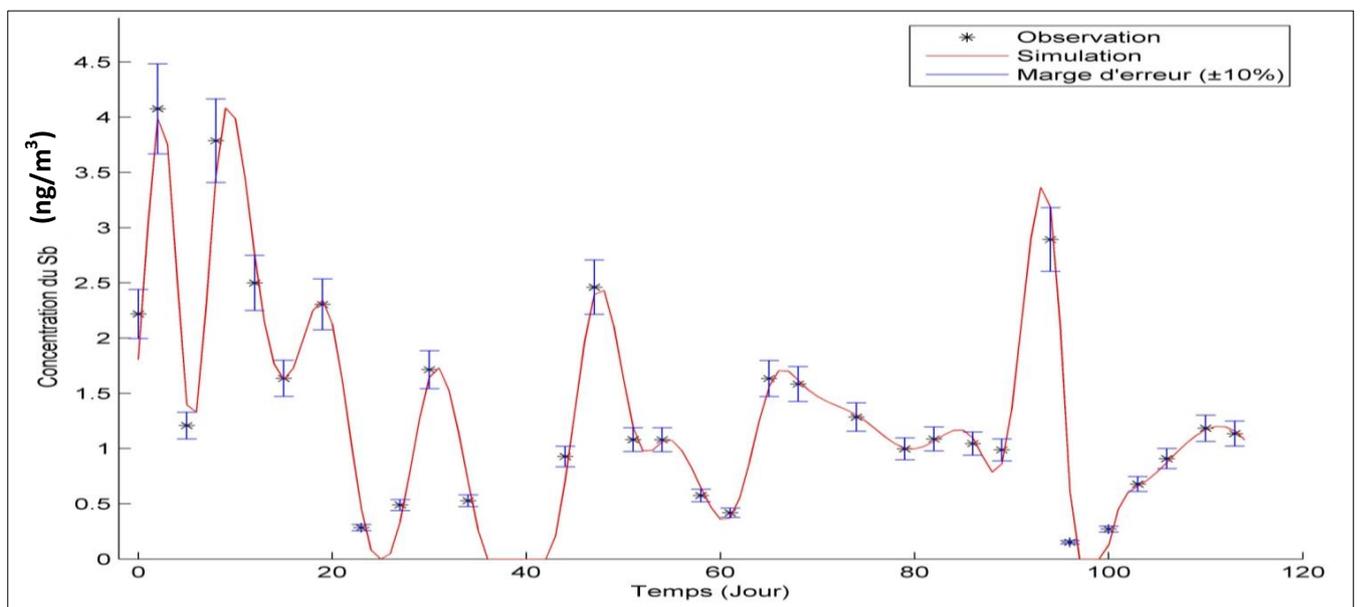


Figure V-57: Prédiction de l'Antimoine (Sb).

R^2 (%)	VCDME (%)
98,43	64,52

Les résultats de la prévision des TSP et des ETM associés à ces TSP pendant les quatre premiers mois de l'année 2012 ont été très cohérents à comparer avec les concentrations réelles, ce qui confirme que nos modèles élaborés ainsi que nos techniques de prévision ont été correctes.

Concernant les données de l'année 2012, l'échantillonnage et la quantification réelle des TSP ainsi que les ETM associés ont pris huit (08) mois environ, alors qu'avec nos techniques et nos modèles de prévision, nous avons eu les mêmes résultats (en terme de précision) mais que dans 30 minutes (temps d'introduction des valeurs des TSP et exécutions des programmes).

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude est la première étude de la modélisation des Totales Particules en Suspension (TSP) et les Eléments Traces Métalliques associés (ETM) en Algérie et la première étude mondiale de la prévision des ETM à partir des TSP en utilisant l'intelligence artificielle par les réseaux de neurones artificiels.

Au cours de cette étude, nous avons estimé les niveaux de la pollution de l'air ambiant par les Totales Particules en Suspension (TSP) et les Eléments Traces Métalliques (ETM) associés au niveau de la banlieue de Draria, commune de la wilaya d'Alger.

L'étude montre qu'en ce site, la pollution de l'air par les TSP n'est pas inquiétante et relativement faible vu que 85,5% des valeurs enregistrées ne dépassaient pas la valeur cible Algérienne ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$). Nous avons enregistré le 30/11/2011 une teneur atmosphérique en TSP supérieure à la norme fixée par l'OMS ($80\mu\text{g}/\text{m}^3$), en effet, par manque de données météorologiques, nous n'avons pas pu expliquer ce pic.

Afin d'étudier la pollution atmosphérique en Elément Traces Métallique (ETM) associés au TSP, le recours à la méthode d'Analyse par Activation Neutronique et sa méthode relative s'est avéré judicieux, cette méthode avec une remarquable précision et une grande sensibilité nous a permis d'aboutir à des résultats de haute précision accompagnés par des incertitudes très admissibles. Cependant l'étude qualitative de l'air ambiant de notre site d'étude a révélé l'existence de trente cinq (35) élément traces métalliques dont vingt cinq (25) ont été quantifiés, les restantes n'ont été pas détecté par manque de standard internationaux adéquats.

En comparant nos résultats de quantification des ETM avec d'autres villes mondiales, nous avons constaté que la pollution atmosphérique au niveau de notre site d'étude est relativement faible. Le Fer issu de la croûte terrestre et le Sodium résultant des brumes des vagues sont les métaux les plus abondants dans l'atmosphère. Nous avons pu constater la contribution de divers secteurs industriels aux phénomènes de la pollution atmosphérique dont les plus marquants sont : l'industrie de la céramique, du polissage et du verre, en plus du trafic routier qui est ces dernières années en réelle expansion en Algérie.

Après avoir testé trois techniques différentes de modélisation (lissage exponentiel double, le modèles ARMA et les réseaux de neurones artificiels), l'objectif n'était pas d'expliquer les phénomènes physiques mis en jeu mais d'élaborer un modèle pour chaque élément qui permettra la simulation de ses concentrations dans le futur proche.

Cette étude a permis de démontrer l'intérêt de l'intelligence artificielle par les réseaux de neurones comme outil de modélisation de la pollution atmosphérique en TSP et en ETM associés en modélisant les TSP ainsi que dix (10) Elément Traces Métalliques.

Nous avons proposé un réseau capable de modéliser, détecter, estimer et de prévoir les ETM à partir des TSP, l'idée consistait à élaborer un modèle combiné, à partir des réseaux de neurones, qui prévoit d'un seul coup les TSP et les ETM associés.

Globalement, les différentes études que nous avons menées donnent des résultats intéressants et prometteurs qui témoignent de la faisabilité et la validité de notre démarche :

- Les résultats de la prévision des TSP et des ETM associés que nous avons obtenu pour les quatre premiers mois de l'année 2012 ont été comparées avec les concentrations réelles, une parfaite **cohérence** en terme de précision a été constatée.
- Avec nos techniques et nos modèles de prévision, l'obtention de ces résultats **n'a pris que 30 minutes**, alors que l'échantillonnage et la quantification réelle des TSP ainsi que les ETM associés élaborés par la méthode classique a duré environ huit (08) mois.
- Nous avons **créé des scénarios prévisionnels** de la pollution atmosphérique relatifs à notre site d'étude dans un but préventif, que la méthode classique ne le permet pas.

A la lumière de ces résultats, pour une extension de ce travail nous proposons :

- L'enrichissement de la base de données en continuant l'échantillonnage et l'analyse de la pollution atmosphérique au niveau de notre site.
- L'étude des facteurs d'enrichissements pour une meilleure compréhension des différents phénomènes impliqués dans la pollution atmosphérique relative à notre site d'étude site.
- L'élaboration et la mise en œuvre d'une réglementation en matière de qualité de l'air ambiant qui comporte des prescriptions techniques et des normes d'émissions des rejets par les sources émettrices et la contribution à la normalisation des Eléments Traces Métalliques.
- L'installation d'autres préleveurs au niveau des sites avoisinants afin d'établir une cartographie de la pollution atmosphérique de la région (toute la commune de Draria) puis de la ville d'Alger.
- L'élaboration d'un modèle prévisionniste à partir des données météorologiques.
- Implication de l'autorité dans l'installation de stations météorologiques (température, vitesse et direction de vent, humidité relative) ou la communication de ces dernières dans le but d'évaluer instantanément les TSP ainsi que les ETM associés.
- L'étude des corrélations sur les ETM afin d'élaborer des modèles de prévisions pour les Eléments Traces Métalliques détectés.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Sportisse, Bruno.** *Pollution atmosphérique: Des processus à la modélisation.* Paris : Springer, 2008. 978-2-287-74961-2.
- [2] **Ferkha, mohamed Karim et Lakehal, camelia.** *Utilisation des lichens pour le dosage des éléments traces métalliques par la méthode d'analyse par activation neutronique.* Alger : ENP, 2012.
- [3] **Deletraz.** *Pollution atmosphérique, trafic routier et environnement.* New york : s.n., 2006.
- [4] <http://www.deq.state.or.us/daq/planning/>. [En ligne]
- [5] [En ligne] <http://a398.idata.over-blog.com/540x362/0/00/49/42/>.
- [6] **PIERVITTORI, R et MAFFEI, S.** *he importance of indicator species in the biomonitoring of atmospheric pollution, a case study in the city of Aosta.* Italy : Cryptogamie Mycologie, 2001.
- [7] <http://www.who.int/hinari/fr/>. Genève : OMS, 2013.
- [8] **Daniel, Leyni-Barbaz.** *Développement d'une méthode de dosage du mercure dans l'air à base d'hopcalite par analyse par activation neutronique.* Montréal : Université de Montréal, 2001.
- [9] www.cder.dz. [En ligne] 12 Avril 2012.
- [10] http://www.cap-environnement.com/filtres_small2.jpg. [En ligne]
- [11] **K, OIKAWA.** *Analyse des Echantillons Atmosphériques, Centre de Recherche.* Alger : s.n., 1999.
- [12] **C., HINDS W.** *Aerosol Technology.* Ed. WJ. USA : s.n.
- [13] **Maurice LEROY, Agnès HAGÈGE, Alain LAMOTTE.** *Analyse de traces et d'ultratraces d'éléments.* Paris:France : Techniques de l'ingénieur, 03 juin 2013. 7200092269 - cerist // 193.194.76.5.
- [14] **H.R., Verma.** *Atomic and nuclear analytical mrthodes.* New York : Springer. 10 3-540-30277-8.
- [15] **REVEL, Gilles.** *Analyse par activation.* s.l. : Techniques de l'ingénieur.
- [16] http://www.unice.fr/lrsae/lrsae_2006/lrsae_fichiers/spectre.jpg.
- [17] **Guy PINTE, Serge MAY.** *Analyse par activation neutronique.* Paris, France : Techniques de l'ingénieur, 10 janvier 1993. 7200092269 - cerist // 193.194.76.5.
- [18] **Mounia, El yamani.** *Pollution atmosphérique urbaine.* Assef : s.n., Juin 2006. S.I.

- [19] **CITEPA**. *Air fobed*. 2006.
- [20] **Contamine, Jérôme**. Le magazine de la chronique scientifique. *La modélisation, un outil au service de la Recherche*. Novembre 2005, 6.
- [21] **Livet, Alain, Leroux et Pierre**. <http://fr.wikipedia.org/wiki/>. [En ligne] 2007. <http://fr.wikipedia.org/wiki/modélisation>.
- [22] [En ligne] http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/matiere-1/d/modelisation_11321/.
- [23] **JOURDAIN, Franck**. *Modélisation des transferts atmosphériques de polluants*. s.l. : Technique de l'ingénieur, 10 janv. 2007. IN65 p 3.
- [24] **NASA**. La Chine a la pollution atmosphérique la plus importante. http://www.chine-informations.com/forum/la-chine-a-la-pollution-atmospherique-la-plus-importante_26983.html. [En ligne]
- [25] **Dress, François**. *Les probabilités et la statistique*. France : DUNOD, 2006. p. 65;127;181;. 978-2-10-051403-8.
- [26] [En ligne] 27 mars 2013. http://fr.wikipedia.org/wiki/Correlation_statistique.
- [27] **SAPORTA, Gilbert**. *Probabilités, analyse des données et statistique*. France : Teclmip, 2006. 2-7108-0814-5.
- [28] **MARTIN, Arnaud**. *L'analyse de données*. Septembre 2004. 1463.
- [29] **Baillargeon, Jacques**. *L'analyse factorielle exploratoire*. 22 janvier, 2003.
- [30] **lemond, Gerard**. *Les réseaux de neurones*.
- [31] **GERARD**. *Réseaux de neurones pour la modélisation et la commande de processus*. R 8 F1-8.3.2.
- [32] **Master, université de Paris**. *Introduction aux réseaux de neurones*. 2005- 2006.
- [33] **paquet, Philippe**. *L'utilisation des réseaux de neurones artificielles en finances*. Orléan : Faculté de droit, d'économie et de gestion., 1997. 1997-1.
- [34] **Jauffert, Philippe**. *Introduction aux réseaux de neurones*. Montpellier : Laboratoire des systèmes d'information chimique., Décembre 2002.
- [35] **DREYFUS, G**. *Les réseaux de neurones*. Paris : École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI),, septembre 1998.
- [36] **Lourakis, Manolis I. A**. *A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemened*. Crete, Greece : Institute of Computer Science, February 11, 2005.
- [37] *Principles of training multi-layer neural network using backpropagation*. s.l. : www.citedeszero.com.

- [38] **Anda Ionescu, Yves Candau.** *Air pollutant emissions prediction by process modelling e Application in the iron and steel industry in the case of a re-heating furnace.* France : Science directe, 22 December 2006. *Environmental Modelling & Software* 22 (2007) 1362e1371.
- [39] **Kunwar P. Singh*, Ankita Basant1, Amrita Malik, Gunja Jain.** *Artificial neural network modeling of the river water quality—A case study.* India : Elsevier, 2009. *Ecological Modelling* 220 (2009) 888–895.
- [40] Autocorrélation. [En ligne] 19 Mars 2013. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Autocorrélation>.
- [41] **JACQUES, Julien.** *Introduction aux séries temporelles.* Lille : s.n.
- [42] **Régis, Bourbonnais et Michel, Terreza.** *Analyse des séries temporelles.* France : Dunod, 2004. 2100484362.
- [43] **Dreyfus J.Martinez, M.Samuelides, M.Gordon, F.Badran, S.Thiriaet, L.Hérault.** *Réseaux de neurones-Modélisation et applications.* Paris,France : Eyrolles, 2002.p
- [44] **Sroor A., Walley El-Shershaby A., Abdel-Haleem.** *Appl. Radiat. Isotopes.* 2002.
- [45] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Draria>. 13 mars 2013.
- [46] **Firestone, RB et Shirley, VS.** *Table of Isotopes 8 th Edition–2.*
- [47] **Khodja, Z.** *Contribution à l'étude de la pollution de l'air par les métaux lourds en.* Alger : ENP, 2010.
- [48] **FONTAN, J.** *Les Pollutions de l'Air les Connaitre pour les Combattre.* Paris : Vuibert, 2003.
- [49] http://www.iauidf.fr/fileadmin/Etudes/etude_171/nr_environnement_et_sante_2.pdf.
- [50] **Veschanbre, S.** *Caractérisation et quantification des éléments traces métalliques dans les dépôts et les particules atmosphériques de la vallée d'Apse (Pyrennes). Mise en place d'indicateurs de la qualité de l'air liés au trafic routier.* s.l. : université de Pau et de pays de l'Aour, 2006.
- [51] **Soete D., Gijbels R., Hoste J.** *Neutron Activation Analysis.* Wiley- Interscience : s.n., 1972.
- [52] **SERAGHNI, Nassira.** *MESURE DE LA POLLUTION PARTICULAIRE ET METALLIQUEDANS L'AIR AU NIVEAU DE TROIS SITES URBAINS DE LA VILLE DE CONSTANTINE.* Canstantine : Université de Canstantine, 2007.
- [53] **BERT V, DERAM A.** *Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds.* France : Environnement et Développement alternatif, 1999. Cité par Fanny VANOBBERGHEN, la phytoremédiation en Wallonie: Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds. Bruxelles : Université libre de Bruxelles, 2010..

- [54] **Fanny, VANOBBERGHEN.** *La phytoremédiation en Wallonie : Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds.* Bruxelles : université libre de Bruxelles, 2010.
- [55] **IFMT-MS-Santé.** *Santé.* 2006.
- [56] **BONNARD N, CLAVEL T, FALCY M, JARGOT D, HESBURT A, PROTOIS J.C, SCHNEIDER O.** *Fiche toxicologique du sodium.* s.l. : INRS, 2006.
- [57] **l'environnement, Conseil canadien des ministères de.** *Recommandations canadiennes pour la qualité des sols: Environnement et santé humaine:sélénium.* s.l. : Wiping, 2009.
- [58] *www.lenntech.fr.* [En ligne] <http://www.lenntech.fr/periodique/elements/>.
- [59] **Sandrine G., Laurence G, Cathrine R., Sébastien L., Rémi L., Jean-Louis C.** 2000.
- [60] **LAPERCHE V, BODENAN F, DICTOT M.C, BARABGER Ph.** *Guide méthodologique de l'arsenic appliqué à la gestion des sites et sols pollués.* s.l. : BRGM, 2003.

Annexes

Annexe1: Exemple d'un spectre d'acquisition des données de la spectrométrie gamma

ORTEC g v - i (61) Wan32 G53W2.12 25/04/2013 11:57:41
DPAN/CRND Spectrum name: 06101001a.An1

Sample description

Standard GSV4 echantillon N°1 ; masse ech: 83.8 mg;
masse en v: 75.3 mg

Spectrum Filename: C:\User\Spectres\EX061010\EX061010a\06101001a.An1

Acquisition information

Start time: 16/04/2013 11:07:50
Live time: 3600
Real time: 3657
Dead time: 1.55 % Detector ID: 1

Detector system

DTNLABAAN MCB 337

Calibration

Filename: 06101001a.Spc eu152

Energy Calibration

Created: 17/01/2013 08:35:34
Zero offset: 0.229 keV
Gain: 0.500 keV/channel
Quadratic: -1.443E-08 keV/channel²

Efficiency Calibration

Created: 08/09/2011 16:19:11
Knee Energy: 0.00 keV
Above the Knee: None
Uncertainty = 0.00 %
Below the Knee: None
Uncertainty = 0.00 %

Library Files

Main analysis library: NAA MP&LP.Lib
Library Match Width: 0.500

Analysis parameters

Start channel: 20 (10.23keV)
Stop channel: 4048 (2023.35keV)
Peak rejection
level: 100.000%

```

Peak search
sensitivity: 3
Sample Size: 8.
3800E+01
Activity scaling factor: 1.0000E+00/( 1.0000E+00*
8.3800E+01) =1.1933E-02

Detection limit method:
method
Random error: 1.0000000E+00
Systematic error: 1.0000000E+00
Fraction Limit: 0.000%
Background width: best method
(based on spectrum).
Half lives decay limit: 12.000

Activity range factor: 2.000
Min. step backg. energy 0.000
Multiplet shift channel 2.000

```

Decay correct to date: NO Decay during acquisition: NO Decay during o

Energy Calibration

Normalized diff: 0.1659

```

***** U N I D E N T I F I E D P E A K S U M M A R Y
***** Peak Centroid Background Net Area Intensity
Uncert FWHM Suspected
Channel Energy Counts Counts Cts/Sec 1 Sigma % keV Nuclide

20.70 10.45 20105. 894. 0.248 22.69 0.919 HG-203 D
26.67 13.44 29406. 752. 0.209 32.44 0.922 SE-75 D
34.39 17.42 60206. 2072. 0.576 27.85 2.516 BR-82 s
49.49 24.96 40119. 773. 0.215 51.95 0.343 SE-75 s
60.91 30.67 56295. 9850. 2.736 5.74 1.361 TE-131 s
69.77 35.10 51188. 2814. 0.782 18.95 1.191 BA-139 s
82.27 41.35 41544. 25450. 7.069 1.90 1.333 CE-141 s
93.80 47.27 26821. 5392. 1.498 4.51 0.957 GD-153 D
100.91 50.83 23793. 802. 0.223 27.42 0.961 U-237 D
119.07 59.60 16232. 640. 0.178 28.45 0.970 AM-241 D
125.36 62.75 19035. 748. 0.208 26.34 0.974 TH-234 D
138.91 69.66 22752. 3018. 0.838 11.32 1.138 AU-196
149.62 75.01 15951. 1815. 0.504 14.11 1.155 TL-208
169.43 84.83 14731. 669. 0.186 25.96 0.997 TL-208 D
173.95 87.09 17140. 352. 0.098 52.92 0.999 TH-234 D
184.13 92.18 15658. 1255. 0.349 14.38 1.004 BR-82 D
266.70 133.44 8086. 267. 0.074 48.00 1.046 CE-144 D
318.42 159.39 9495. 3153. 0.876 7.46 1.225 MO-99
470.19 235.25 3488. 224. 0.062 49.88 1.283 ZR-95
500.30 250.30 5569. 282. 0.078 37.94 1.161 LU-177 D
546.63 273.49 4926. 578. 0.161 17.66 1.183 BR-82 D

```

729.69	364.77	4426.	269.	0.075	35.53	1.268	J-131	D
1021.88	511.07	3761.	1220.	0.339	7.66	1.395	NA-22	D
1055.24	527.80	1958.	161.	0.045	39.76	1.409	MO-99	D
1139.97	569.95	2698.	249.	0.069	30.13	1.444	CO-57	D
1188.52	594.28	2574.	184.	0.051	70.68	0.754	ND-147	s
1226.84	613.32	2382.	110.	0.031	63.56	1.479	RU-103	D
1579.29	789.50	1033.	112.	0.031	41.53	1.613	SB-124	D
1592.25	795.98	1536.	692.	0.192	8.87	1.617	CS-134	D
1647.83	823.67	1298.	81.	0.022	64.25	1.637	MO-99	D
1715.45	857.64	1265.	173.	0.048	32.38	1.767	J-134	
2015.89	1008.04	1385.	269.	0.075	20.49	1.759	TE-131	D
2595.31	1297.46	802.	390.	0.108	11.45	1.921	J-133	D
3339.37	1669.22	94.	20.	0.005	76.79	1.061	-	s
3464.83	1731.92	414.	1661.	0.461	3.57	2.398	BI-214	s
3744.47	1871.67	238.	103.	0.029	27.17	0.744	-	s
4007.74	2003.23	3483.	697.	0.194	14.75	1.753	XE-138	s

s - Peak fails shape tests.

D - Peak area deconvoluted.

***** I D E N T I F I E D P E A K S U M M A R Y							
***** Nuclide							
	Intensity	Channel Energy	Peak Uncert Counts	Centroid FWHM Counts	Background Cts/Sec	Net Area 1 Sigma	% keV
J-131	160.88	80.64	12710.	256.	0.071	82.63	0.748
EU-155	172.69	86.54	17636.	206.	0.057	91.32	0.998D
CD-109	175.67	88.03	16921.	81.	0.022	228.53	1.000D
Nd-147	181.81	91.11	16608.	266.	0.074	68.77	1.003D
GD-153	194.47	97.43	12319.	732.	0.203	21.77	1.009D
NP-239	198.71	99.55	14475.	665.	0.185	25.86	1.012D
TA-182	199.82	100.11	14757.	108.	0.030	159.09	1.012D
GD-153	205.97	103.18	15672.	16659.	4.627	1.32	1.015D
NP-239	207.13	103.76	28758.	1405.	0.390	17.28	1.016D
EU-155	210.22	105.31	18367.	135.	0.037	142.30	1.017D
NP-239	211.86	106.12	12896.	889.	0.247	18.38	1.018D
Yb-169	219.17	109.78	12098.	508.	0.141	30.92	1.022D
LU-177	225.51	112.95	11721.	540.	0.150	28.68	1.025D
YB-175	227.22	113.81	11660.	364.	0.101	42.33	1.026D
NP-239	233.62	117.00	11123.	314.	0.087	47.87	1.029D
SE-75	241.85	121.12	10978.	114.	0.032	130.77	1.034D
EU-152	243.19	121.78	10935.	390.	0.108	38.27	1.034D
EU-154	245.76	123.07	13075.	39.	0.011	417.30	1.036D
Ba-131	247.23	123.81	10313.	2661.	0.739	5.73	1.036D
HF-181	265.67	133.02	6865.	181.	0.050	64.99	1.046D
W-187	268.12	134.25	10932.	0.	0.000	1000.00	1.047D
SE-75	271.63	136.00	9198.	134.	0.037	101.76	1.049D
MO-99	280.65	140.51	8793.	191.	0.053	69.88	1.053D
FE-59	284.94	142.65	9984.	89.	0.025	158.36	1.055D
CE-141	290.52	145.44	8498.	1373.	0.381	9.87	1.058D
TA-182	305.67	153.01	4186.	166.	0.046	67.95	0.750

Yb-169	354.08	177.21	6814.	214.	0.059	55.00	1.089D
MO-99	361.80	181.07	7748.	155.	0.043	80.81	1.093D
FE-59	385.13	192.73	5481.	230.	0.064	64.71	1.044
Yb-169	395.86	198.09	7911.	396.	0.110	52.91	1.975s
LU-177	416.21	208.27	8360.	597.	0.166	37.74	1.200s
Ba-131	432.07	216.19	6520.	1291.	0.359	14.26	1.059
TA-182	442.65	221.48	7096.	2150.	0.597	9.44	1.089s
NP-239	456.06	228.18	4408.	410.	0.114	23.45	1.140D
TA-182	458.34	229.32	5480.	51.	0.014	204.52	1.141D
EU-152	489.10	244.70	3526.	17.	0.005	506.88	1.155D
EU-154	495.57	247.93	5747.	129.	0.036	83.25	1.159D
SN-113	509.83	255.06	5171.	106.	0.030	96.01	1.165D
TA-182	528.01	264.14	3158.	76.	0.021	139.71	0.610s
SE-75	529.22	264.75	3233.	0.	0.000	1000.00	1.175
NP-239	554.92	277.60	4782.	266.	0.074	37.22	1.187D
HG-203	558.12	279.20	4981.	57.	0.016	176.03	1.188D
SE-75	558.82	279.54	3483.	0.	0.000	0.00	1.456D
YB-175	564.77	282.52	4767.	377.	0.105	26.44	1.191D
J-131	568.34	284.30	4309.	126.	0.035	74.48	1.193D
TB-160	596.90	298.58	4038.	239.	0.066	38.17	1.206D
Pa-233	600.42	300.34	4697.	236.	0.065	41.65	1.208D
Pa-233	624.09	312.17	4636.	831.	0.231	12.10	1.219D
K-42	624.95	312.60	5430.	75.	0.021	139.94	1.220D
CR-51	639.97	320.11	5150.	721.	0.200	24.66	1.142s
LA-140	657.36	328.80	6480.	4138.	1.149	3.71	1.258
Pa-233	681.39	340.81	4579.	271.	0.075	35.80	1.246D
EU-152	688.34	344.28	4630.	329.	0.091	29.77	1.249D
HF-181	691.64	345.93	3078.	0.	0.000	0.00	1.412D
J-131	728.77	364.49	4163.	29.	0.008	312.83	1.267D
Ba-131	746.42	373.31	5820.	850.	0.236	23.99	1.431s
SN-113	783.18	391.69	3013.	5.	0.001	1568.75	1.292D
TB-160	784.83	392.51	3287.	133.	0.037	61.69	1.292D
YB-175	792.47	396.33	3854.	439.	0.122	20.55	1.296D
SE-75	801.13	400.66	3371.	114.	0.032	72.32	1.300D
EU-152	822.07	411.12	5728.	0.	0.000	1000.00	1.309
AU-198	823.40	411.79	4510.	2462.	0.684	5.01	1.307
SB-125	855.58	427.88	1959.	17.	0.005	379.36	1.324D
LA-140	864.82	432.49	3413.	621.	0.172	13.90	1.328D
EU-152	886.00	443.08	999.	102.	0.028	49.99	0.250s
SB-125	927.25	463.70	1914.	118.	0.033	74.72	0.986
W-187	958.97	479.55	1988.	60.	0.017	105.52	1.369D
HF-181	964.23	482.18	2935.	173.	0.048	44.82	1.371D
LA-140	973.92	487.02	3258.	6537.	1.816	1.75	1.375D
Ba-131	992.74	496.43	4132.	1499.	0.416	8.06	1.297s
RU-103	994.13	497.12	4684.	0.	0.000	1000.00	1.384
Sr-85	1027.90	514.00	3846.	167.	0.046	52.97	1.398D
Nd-147	1061.94	531.02	2585.	145.	0.040	50.33	1.412D
BR-82	1108.63	554.35	2772.	28104.	7.807	0.65	1.431D
AS-76	1118.13	559.10	3049.	743.	0.206	11.13	1.435D
AS-76	1126.40	563.23	4428.	371.	0.103	25.87	1.439D
SB-122	1128.42	564.24	2897.	1895.	0.526	4.63	1.440D
CS-134	1138.60	569.33	2062.	0.	0.000	0.00	2.350D

EU-154	1184.00	592.02	2368.	0.	0.000	1000.00	1.462
SB-125	1201.16	600.60	1597.	100.	0.028	57.36	1.469D
SB-124	1205.43	602.73	2592.	418.	0.116	17.92	1.471D
CS-134	1209.41	604.72	2985.	949.	0.264	8.77	1.472D
RU-103	1220.63	610.33	1215.	0.	0.000	0.00	0.000D
BR-82	1238.19	619.11	2304.	15477.	4.299	0.92	1.484D
Ga-72	1259.91	629.96	1552.	33.	0.009	171.11	1.492D
SB-125	1271.90	635.95	2220.	27.	0.007	250.46	1.497D
J-131	1273.97	636.99	1956.	42.	0.012	150.24	1.498D
SB-124	1292.82	646.41	988.	24.	0.007	182.23	0.682s
AS-76	1314.11	657.05	1417.	62.	0.017	86.93	1.514D
AG-110M	1315.53	657.76	1820.	0.	0.000	1000.00	1.514D
CS-137	1323.33	661.66	1807.	46.	0.013	131.75	1.517D
W-187	1372.00	685.99	1563.	105.	0.029	60.33	1.051
EU-154	1384.89	692.42	1673.	6.	0.002	962.89	1.541D
SB-122	1385.34	692.65	1572.	107.	0.030	53.38	1.541D
BR-82	1396.79	698.37	1694.	9091.	2.525	1.23	1.545D
NB-94	1405.29	702.62	1820.	67.	0.019	91.41	1.549D
AG-110M	1413.41	706.68	1600.	0.	0.000	0.00	1.914D
SB-124	1445.63	722.79	1281.	46.	0.013	112.00	1.564D
EU-154	1446.67	723.30	1473.	0.	0.000	1000.00	1.564D
ZR-95	1448.46	724.20	1451.	22.	0.006	248.56	1.565D
MO-99	1479.49	739.71	1522.	91.	0.025	70.53	0.455s
LA-140	1503.36	751.64	1432.	455.	0.126	12.67	1.585D
ZR-95	1513.55	756.73	1240.	43.	0.012	117.61	1.589D
EU-154	1513.70	756.80	1453.	0.	0.000	1000.00	1.589D
AG-110M	1527.98	763.94	1613.	86.	0.024	66.58	1.594D
TB-160	1530.66	765.28	1838.	19.	0.005	320.13	1.595D
NB-95	1531.71	765.81	1666.	0.	0.000	20191.22	1.596D
BR-82	1553.38	776.64	3062.	24019.	6.672	0.80	1.686
MO-99	1556.21	778.05	25058.	0.	0.000	1000.00	1.604
EU-152	1557.91	778.90	19600.	0.	0.000	1000.00	1.605D
CS-134	1591.85	795.86	2411.	0.	0.000	1000.00	1.617D
LA-140	1631.93	815.89	2138.	2256.	0.627	4.21	1.677
BR-82	1655.80	827.83	1741.	6827.	1.896	1.49	1.640D
Ga-72	1668.21	834.03	1910.	226.	0.063	28.08	1.644D
EU-152	1734.96	867.39	1807.	24.	0.007	256.03	1.668D
LA-140	1735.87	867.85	1554.	443.	0.123	13.44	1.668D
NB-94	1742.37	871.09	1853.	37.	0.010	164.38	1.670D
EU-154	1746.56	873.19	1696.	0.	0.000	1000.00	1.672D
TB-160	1758.96	879.38	1612.	111.	0.031	52.08	1.676D
AG-110M	1769.56	884.68	1662.	0.	0.000	0.00	1.679D
SC-46	1778.75	889.28	1624.	4162.	1.156	2.07	1.682D
Ga-72	1788.70	894.25	1277.	1.	0.000	4176.40	1.686D
LA-140	1839.32	919.55	1157.	240.	0.067	21.06	1.703D
LA-140	1850.61	925.19	1489.	569.	0.158	10.47	1.706D
AG-110M	1875.76	937.76	1263.	37.	0.010	159.16	0.397s
EU-152	1928.52	964.13	1423.	40.	0.011	134.35	1.732D
TB-160	1932.61	966.17	1330.	32.	0.009	163.49	1.733D
EU-154	1992.81	996.26	1514.	22.	0.006	248.24	1.752D
TB-160	2006.06	1002.88	1516.	41.	0.011	134.73	1.756D
EU-154	2009.75	1004.72	1609.	3.	0.001	1914.12	1.757D

BR-82	2088.69	1044.18	2674.	6444.	1.790	2.11	1.880
Ga-72	2102.10	1050.88	1297.	0.	0.000	1000.00	1.786
RB-86	2154.27	1076.96	2960.	6680.	1.856	2.09	1.787
EU-152	2172.20	1085.91	1582.	148.	0.041	38.99	1.807D
EU-152	2179.77	1089.70	1460.	51.	0.014	107.52	1.809D
FE-59	2199.19	1099.41	2355.	734.	0.204	12.91	1.871
EU-152	2224.62	1112.12	1199.	4.	0.001	1325.94	1.822D
TB-160	2230.63	1115.12	2838.	0.	0.000	1000.00	1.824D
ZN-65	2231.49	1115.55	1634.	1035.	0.287	6.34	1.824D
SC-46	2241.49	1120.55	2589.	2631.	0.731	3.36	1.827D
TA-182	2243.00	1121.30	4336.	853.	0.237	11.44	1.827D
CO-60	2346.92	1173.24	1304.	360.	0.100	15.13	1.856D
TB-160	2356.38	1177.96	1236.	101.	0.028	50.47	1.859D
TA-182	2382.36	1190.95	589.	15.	0.004	230.27	0.584s
EU-152	2422.82	1211.17	607.	31.	0.009	117.08	0.498s
TA-182	2445.77	1222.64	1053.	85.	0.024	68.80	2.188s
TA-182	2461.97	1230.74	858.	51.	0.014	97.69	1.150s
EU-154	2548.00	1273.73	245.	5.	0.001	381.10	0.000s
FE-59	2583.75	1291.60	802.	420.	0.117	10.70	1.918D
EU-152	2598.81	1299.12	1065.	15.	0.004	303.48	1.922D
BR-82	2635.92	1317.67	1166.	5100.	1.417	1.83	2.022
CO-60	2664.57	1331.99	784.	294.	0.082	18.34	2.955s
SB-124	2736.96	1368.16	20395.	3518.	0.977	5.98	1.955D
NA-24	2738.63	1369.00	4201.	19888.	5.524	0.85	1.955D
AG-110M	2769.00	1384.18	131.	0.	0.000	0.00	0.000s
EU-152	2816.50	1407.92	510.	137.	0.038	33.39	1.683s
BR-82	2950.90	1475.09	494.	2795.	0.776	2.51	2.245
AG-110M	3009.00	1504.12	71.	5.	0.001	238.19	0.125s
K-42	3050.43	1524.82	488.	2973.	0.826	2.64	2.297
LA-140	3193.27	1596.21	3991.	1149.	0.319	8.31	2.050D
EU-154	3193.84	1596.49	1610.	3530.	0.981	2.33	2.050D
SB-124	3383.32	1691.19	243.	108.	0.030	29.16	2.541s

Annexe 2 : Extrait de la table d'Adams & Dams d'attribution des énergies des photons gamma aux éléments

Energy	Intensity	Parent - Associated -rays	Energy	Intensity	Parent - Associated -rays
133.515 2	11.09 11	¹⁴⁴ Ce(284.893 d) - 80.120, 40.98, 33.568	152.8 2	2.23 15	²⁵¹ Bk(55.6 m) - 177.7, 130.1, 163.8
133.99 7	33	¹⁹⁷ Hg(23.8 h) - 279.01, 130.2, 201.6	152.8 2	0.91 10	²⁵¹ Es(33 h) - 177.7, 163.8, 34.0
134.243 6	8.85 16	¹⁸⁷ W(23.72 h) - 685.774, 479.531, 72.001	152.9 2	25 3	²⁴⁶ Am(39 m) - 679.0, 205.0, 75.6
135.34 4	2.565 18	²⁰¹ Tl(72.912 h) - 167.43, 32.19, 30.60	153.4 1	0.259 20	²²⁰ Fr(27.4 s) - 413.0, 234.5, 178.4
135.50 3	0.112	¹⁹³ Pt(4.33 d) - 12.634, 1.642	153.59 3	66 3	¹¹⁹ Te(4.70 d) - 1212.73, 270.53, 1136.75
135.6 1	0.47 5	⁸⁶ Zr(16.5 h) - 242.80, 29.10, 612.00	153.60 1	6.20 3	¹⁵¹ Gd(124 d) - 243.282, 174.70, 21.542
135.90 9	3.24 19	²⁰⁰ Pt(12.5 h) - 76.21, 243.71, 59.97	153.863 2	16 3	²⁴⁴ Am(10.1 h) - 743.971, 897.848, 99.383
136.0001 6	58.3 7	⁷⁵ Se(119.779 d) - 264.6576, 279.5422, 121.1155	154.21 1	5.62 14	²²³ Ra(11.435 d) - 269.459, 323.871, 144.232
136.266 13	5.85 19	¹⁸¹ Hf(42.39 d) - 482.182, 133.024, 345.916	154.23 3	0.125 7	²³⁰ U(20.8 d) - 72.20, 230.37, 158.18
136.266 13	0.0311 10	¹⁸¹ W(121.2 d) - 6.238, 152.315	154.35 6	0.0010 3	²⁵⁴ Fm(3.240 h) - 99.163, 42.723
136.4743 5	10.68 8	⁵⁷ Co(271.79 d) - 122.0614, 14.41300, 692.03	154.57 2	47	¹⁴⁶ Gd(48.27 d) - 115.51, 114.71, 576.0
137.157 8	9.42 6	¹⁸⁶ Re(3.7183 d) - 122.30	155.0 4	-0.0019	²⁵² Cf(2.645 y) - 43.38, 100.4
137.157 8	41	¹⁸⁶ Ir(16.64 h) - 296.90, 434.84, 773.28	155.032 12	15.1 5	¹⁸⁸ Re(17.005 h) - 632.99, 477.99, 931.34
137.157 8	23.0 23	¹⁸⁶ Ir(1.90 h) - 1.5, 767.497, 630.34	155.032 12	29.7 24	¹⁸⁸ Ir(41.5 h) - 2214.62, 632.99, 477.99
138.733 11	0.00391 25	¹³⁴ Cs(2.903 h) - 127.5021, 11.242	155.16 12	0.097	¹⁹² Ir(241 y)
138.938 5	4.27 20	¹⁹³ Os(30.11 h) - 460.547, 73.042, 557.429	155.37 4	10.5 5	¹³² Ce(3.51 h) - 182.11, 216.83, 190.04
139.03 5	13.9 10	²⁵² Es(471.7 d) - 924.12, 800.01, 785.09	156.02 3	2.113 6	¹¹⁷ Sn(13.60 d) - 158.562, 314.3
139.1 2	44.6 20	¹⁸¹ Hf(4.12 h) - 344.9, 181.0, 41.4	156.088 2	7.0 10	¹⁸² Hf(9.10 ⁶ y) - 270.4031, 114.3152, 172.5708
139.634 8	12.7 3	¹⁷³ Hf(23.6 h) - 123.672, 296.974, 311.239	156.82 5	0.74 5	²²⁴ Ac(2.78 h) - 140.7, 144.44, 261.3
139.9 1	27.46 20	¹⁴⁷ Tb(1.7 h) - 1152.4, 694.4, 119.7	157.2 3	7	¹⁹² Hg(4.85 h) - 274.8, 306.5, 186.4
140.511 1	89.43 23	⁹⁹ Mo(65.94 h) - 739.50, 181.063, 777.921	157.41 4	0.241 4	¹⁰¹ Rh(4.34 d) - 306.857, 545.117, 127.226
140.511 1	89	⁹⁹ Tc(6.01 h) - 142.628, 2.1726	157.42 5	0.0014 2	²⁴² Cm(162.8 d) - 44.08, 101.90, 561.11
140.7 1	0.32 3	²²⁴ Ac(2.78 h) - 156.82, 144.44, 261.3	158.18 3	17.5 5	²²⁶ Ac(29.37 h) - 253.73, 186.05, 67.67
140.86 2	0.021 4	²³² Th(1.405 10 ¹⁰ y) - 63.83	158.18 3	0.070 5	²³⁰ U(20.8 d) - 72.20, 154.23, 230.37
141.178 15	66.8 7	⁹⁰ Nb(14.60 h) - 1129.224, 2318.968, 2186.242	158.260 4	0.290 10	¹³⁵ Xe(9.14 h) - 249.770, 608.151, 408.009
141.2	0.0016	²¹⁰ At(8.1 h) - 82.802, 106, 167	158.35 2	4.0	²³⁶ Np(1.54 10 ⁵ y) - 160.308, 104.234, 45.242
141.3147 22	6.6 5	⁷⁵ Br(96.7 m) - 286.572, 427.883, 377.385	158.37947 9	40.0 3	¹⁹⁹ Au(3.139 d) - 208.20597, 49.82680
142.628 29	0.0187 18	⁹⁹ Tc(6.01 h) - 140.511, 2.1726	158.37947 9	4.96 25	¹⁹⁹ Tl(7.42 h) - 455.46, 208.20597, 247.26
142.652 2	1.02 4	⁵⁹ Fe(44.503 d) - 1099.251, 1291.596, 192.349	158.38 3	98.8 10	⁵⁶ Ni(6.077 d) - 811.85, 749.95, 269.50
143.249 20	0.43 2	²³⁷ Np(2.144 10 ⁶ y) - 29.374, 86.477, 94.66	158.562 12	16	¹¹⁷ In(116.2 m) - 315.302
143.764 2	10.96 8	²³⁵ U(7.038 10 ⁸ y) - 185.712, 163.358, 205.309	158.562 12	86	¹¹⁷ Sn(13.60 d) - 156.02, 314.3
143.87 1	0.0488 22	²³⁰ Th(7.538 10 ⁴ y) - 67.67, 253.73, 186.05	158.562 12	86	¹¹⁷ Sb(2.80 h) - 861.35, 1004.51, 1021.0
144.232 10	3.22 7	²²³ Ra(11.435 d) - 269.459, 154.21, 323.871	158.80 8	0.00045 15	²⁴² Pu(3.733 10 ⁵ y) - 44.915, 103.50
144.44 5	0.205 18	²²⁴ Ac(2.78 h) - 156.82, 140.7, 261.3	158.97 5	84	¹²³ Te(119.7 d) - 88.46, 247.5
144.780 25	3.9 10 ⁻⁷	¹²⁵ Te(57.40 d) - 35.4919, 109.276	158.97 5	83	¹²³ I(13.27 h) - 528.96, 440.02, 538.54
144.863 5	0.328 11	¹⁷⁵ Yb(4.185 d) - 396.329, 282.522, 113.805	159.377 12	68.3 4	⁴⁷ Sc(3.3492 d)
144.99 6	0.192 24	²⁵³ Fm(3.00 d) - 271.8, 62.47, 405	159.955 20	6.54 10 ⁻⁶	²⁴¹ Pu(14.35 y) - 148.567, 103.680, 77.10
145.04 13	83	⁷² Zn(46.5 h) - 191.96, 16.4, 103.14	160.26 5	0.0058 6	²²⁷ Ac(21.773 y) - 100, 69.21, 147.48
145.252 10	4.29 13	¹²⁷ Xe(36.4 d) - 202.860, 172.132, 374.991	160.308 3	32	²³⁶ Np(1.54 10 ⁵ y) - 104.234, 45.242, 101.41
145.4405 28	48.2 3	¹⁴¹ Ce(32.501 d)	160.308 3	0.000402 3	²⁴⁰ Pu(6563 y) - 45.242, 104.234, 212.46
145.4405 28	0.239 24	¹⁴¹ Nd(2.49 h) - 1126.8, 1292.6, 1147.2	160.32 9	0.97 11	¹³⁷ Pr(1.28 h) - 836.7, 433.9, 514.0
145.544 10		²⁴¹ Cm(32.8 d) - 471.805, 430.634, 205.879	160.33 5	0.00191 9	¹²³ Sn(129.2 d) - 1088.64, 1030.23, 1021.00
146 5	0.0035	²⁴⁶ Cf(35.7 h) - 42.13, 96	160.4 1	4.9 5	¹⁷³ Ta(3.14 h) - 172.2, 69.70, 90.3
146.07 20	3.5 5	²⁰⁰ Au(18.7 h) - 332.82, 59.97, 133.23	160.613 8	0.066 5	¹³³ Xe(5.243 d) - 80.9971, 79.6139, 302.853
146.15 7	27.0 11	¹⁷⁹ Hf(25.05 d) - 453.43, 362.39, 122.793	160.7 1	0.379 20	²²⁰ Fr(27.4 s) - 413.0, 234.5, 178.4
146.212	0.089 6	⁴⁴ Ti(63 y) - 78.337, 67.875	161.269 9	6.49 12	¹⁸⁴ Re(169 d) - 252.848, 216.548, 920.932
146.345 2	†35 5	²²⁹ Ac(62.7 m) - 164.522, 569.1, 261.92	161.3467 5	8.9 3	¹⁸³ Ta(5.1 d) - 246.0591, 353.9912, 107.9322
146.345 2	0.098 6	²²⁹ Pa(1.50 d) - 40.09, 64.70, 75.12	162.306 10	0.230 16	¹³⁴ Ce(3.16 d) - 130.414, 300.884, 31.89
146.4 5	0.21 3	¹⁴⁹ Pm(5.53 y) - 453.88, 735.72, 589.3	162.3219 5	23.3 4	¹⁸³ Re(70.0 d) - 46.4839, 291.7238, 208.8057
146.4 5		²³⁹ Cm(2.9 h) - 187.1, 41	162.660 1	6.22 7	¹⁴⁰ Ba(12.752 d) - 537.261, 29.9640, 304.849
146.4 5	0.012 5	²⁴³ Bk(4.5 h) - 187.1, 536, 41	163.24 4	0.024	²⁴² Am(141 y) - 49.367, 86.68, 109.69
146.59 4	37.3 16	⁷⁷ Kr(74.4 m) - 129.64, 311.86, 276.0	163.358 2	5.08 4	²³⁵ U(7.038 10 ⁸ y) - 185.712, 143.764, 205.309
147.48 4	0.0031 3	²²⁷ Ac(21.773 y) - 100, 69.21, 160.26	163.8 2	0.35 7	²⁵¹ Bk(55.6 m) - 177.7, 130.1, 152.8
147.63 2	37.7 10	²⁰⁰ Pb(21.5 h) - 257.17, 235.63, 268.38	163.8 2	-0.10	²⁵¹ Es(33 h) - 177.7, 152.8, 34.0
147.81 2	43	¹⁹⁶ Au(9.6 h) - 188.27, 168.37, 285.49	163.930 8	1.91 6	¹³¹ Xe(11.84 d)
148.193 27	28.3 5	¹⁰³ Ag(65.7 m) - 118.72, 266.86, 1273.83	164.522 2	†100 10	²²⁹ Ac(62.7 m) - 569.1, 261.92, 146.345
148.567 10	.0001855 20	²⁴¹ Pu(14.35 y) - 103.680, 77.10, 159.955	164.61 2	1.86 3	²³⁷ U(6.75 d) - 59.5412, 208.00, 26.3448
148.612 4	2.62 9	¹²⁶ Xe(20.1 h) - 350.065, 416.633, 90.596	164.71 10	26	¹⁷⁰ Hf(16.01 h) - 620.7, 120.19, 572.9
148.7 1	0.011	¹⁹⁰ Ir(3.25 h) - 616.08, 502.53, 361.136	164.8 2	0.0084 18	²⁴⁵ Bk(4.94 d) - 205.879, 471.805, 430.634
148.9 2	49	¹²³ Xe(2.08 h) - 178.1, 330.2, 1093.4	164.97 7	0.26	¹⁹⁷ Hg(23.8 h) - 279.01, 130.2, 201.6
149.735 3	48.2 3	¹⁴⁹ Gd(9.28 d) - 298.634, 346.651, 748.601	164.98 2	26.4 3	¹⁴⁹ Tb(4.118 h) - 352.24, 388.57, 652.12
150.0 2	0.07 3	²²¹ Fr(4.9 m) - 218.19, 410.7, 99.5	165.490 8	2.97 20	²⁴¹ Cm(32.8 d) - 471.805, 430.634, 205.879
150.04 2	0.80 3	²²⁵ Ac(10.0 d) - 99.91, 99.63, 188.00	165.8452 24	12.7 20	¹⁵⁶ Sm(9.4 h) - 87.4897, 203.818, 37.9681
150.059 3	10.8 5	²³³ Pa(1.31 d) - 969.315, 894.351, 453.655	165.864 6	23.7 24	¹³⁹ Ba(83.06 m) - 1420.5, 1254.7, 1310.6
150.392 3	20.3 11	¹⁷⁷ Yb(1.911 h) - 1080.21, 1241.2, 121.6211	165.864 6	0.80 calc	¹³⁹ Ce(137.640 d)
150.824 13	0.0028	¹¹¹ In(2.8047 d) - 245.395, 171.28	166.0 3	0.00066	²³⁶ Pu(2.858 y) - 47.574, 108.96, 643.5
151.159 6	75.0 4	⁸⁵ Kr(4.480 h) - 304.87	166.410 4	0.1036 15	²²⁸ Th(1.9131 y) - 84.373, 215.983, 131.613
151.159 6	2.2 10 ⁻⁶	⁸⁵ Kr(10.756 y) - 514.0067, 362.81, 129.820	167 2	0.0028	²¹⁰ At(8.1 h) - 82.802, 106, 141.2
151.159 6	0.0012 9	⁸⁵ Sr(64.84 d) - 514.0067, 868.5, 362.81	167.43 7	10	²⁰¹ Tl(72.912 h) - 135.34, 32.19, 30.60
151.159 6	12.9 3	⁸⁵ Sr(67.63 m) - 129.820, 731.812, 450.85	167.75 2	8.3 5	¹⁵¹ Pm(28.40 h) - 340.08, 275.21, 717.72
152.22 7	7.3 5	¹⁹⁷ Tl(2.84 h) - 425.84, 1411.34, 577.97	167.844 12	8.81 8	¹⁸⁵ Os(13.0 h) - 381.768, 114.463, 851.474
152.315 17	0.0083 3	¹⁸¹ W(121.2 d) - 6.238, 136.266	167.90 2	0.07	²¹¹ Rn(14.6 h) - 68.573, 236.48
152.63 2	0.00098 5	²⁴⁴ Cm(18.10 y) - 42.824, 98.860, 554.60	168.37 2	7.6 4	¹⁹⁶ Au(9.6 h) - 147.81, 188.27, 285.49
152.720 2	0.000937 10	²³⁸ Pu(87.7 y) - 43.498, 99.853, 766.38	168.688 2	99.2 19	⁵² Fe(8.275 h) - 377.748, 1727.57, 1039.928

Energy	Intensity	Parent - Associated -rays	Energy	Intensity	Parent - Associated -rays
169.2 1	0.115 8	²⁴⁰ U(14.1 h) - 44.10, 189.7, 66.5	195.0 1	22.6 10	²⁰⁹ Au(5.41 h) - 545.0, 781.9, 790.2
169.26 4	0.44 3	¹³⁷ Ce(34.4 h) - 824.82, 762.3, 835.38	195.05 10	18.6 10	¹⁸⁸ Pt(10.2 d) - 187.59, 381.43, 423.34
170.4511 16	6.3 3	¹⁵³ Tb(2.34 d) - 212.0040, 109.7601, 102.2564	196.301 10	25.98 17	⁸⁸ Kr(2.84 h) - 2392.11, 2195.842, 834.830
170.71 5	0.0697 21	¹⁸³ Os(9.9 h) - 1101.94, 1107.92, 1034.85	196.56 3	4.59 14	¹²⁹ Xe(8.88 d) - 39.578
171.28 3	90 calc	¹¹¹ In(2.8047 d) - 245.395, 150.824	197.299 12	3.4 10 ⁻⁷ 6	¹⁴⁷ Pm(2.6234 y) - 121.220, 76.073
171.393 13	2.90 11	¹⁷³ Lu(1.37 y) - 272.105, 78.63, 100.724	197.299 12	27	¹⁴⁷ Eu(24.1 d) - 121.220, 677.516, 1077.043
171.8576 8	4.81 12	¹⁷⁷ Lu(160.4 d) - 413.6636, 319.0205, 121.6211	197.3 3	87.0 11	¹²⁰ Sb(5.76 d) - 1171.3, 1023.1, 89.9
172.132 10	25.5 8	¹²⁷ Xe(36.4 d) - 202.860, 374.991, 145.252	197.95788 6	35.8 3	¹⁶⁹ Yb(32.026 d) - 63.12077, 177.21402, 109.77987
172.18 8	34	¹¹¹ Pd(5.5 h)	197.99 6	73	¹⁰¹ Rh(3.2 y) - 127.226, 325.23, 295.01
172.2 1	18	¹⁷³ Ta(3.14 h) - 69.70, 90.3, 160.4	198.241 1	52.39 16	¹⁶⁸ Tm(93.1 d) - 815.990, 447.515, 184.285
172.5708 22	0.20 4	¹⁸² Hf(9 10 ⁶ y) - 270.4031, 156.088, 114.3152	198.6060 12	1.19 3	⁷⁵ Ge(82.78 m) - 264.6576, 468.6, 419.1
172.6 2	16	²⁵⁶ Es(7.6 h) - 861.8, 231.1, 1092.9	199.2132 10	40.9 22	¹⁵⁶ Tb(5.35 d) - 534.318, 1222.36, 88.9667
173.4 1	18	¹⁹⁸ Pb(2.40 h) - 290.3, 365.4, 865.3	199.50 5	0.55 3	¹³⁸ Nd(5.04 h) - 325.76, 341.65, 215.31
173.52 5	2.7	¹⁹³ Au(17.65 h) - 186.17, 255.57, 268.22	200.38 4	0.79 8	¹⁹⁵ Hg(41.6 h) - 261.75, 560.27, 387.87
173.7 1	8.8 6	¹³³ I(1.387 h) - 98.0, 22	201.3112 7	0.472 6	¹⁹² Ir(73.831 d) - 205.79549, 484.5780, 374.4852
174.70 1	2.96 6	¹⁵¹ Gd(124 d) - 153.60, 243.282, 21.542	201.52 6	6.4 18	¹⁸⁷ Pt(2.35 h) - 106.46, 110.04, 709.17
174.94 4	10	²⁴⁵ Cm(8500 y) - 132.99, 41.95, 189.82	201.6 3	0.034 5	¹⁹⁷ Pt(95.41 m) - 346.5, 53.10
174.954 5	82.00 25	⁷¹ As(65.28 h) - 1095.490, 499.876, 326.785	201.6 3	0.089 13	¹⁹⁷ Hg(23.8 h) - 279.01, 130.2, 77.351
175.361 5	7.48 9	⁴⁸ Sc(43.67 h) - 1312.096, 983.517, 1037.599	201.83 3	86 5	¹⁷⁶ Lu(3.78 10 ¹⁰ y) - 306.78, 88.34, 400.99
175.4 3	10.1 12	⁸⁰ Sr(106.3 m) - 589.0, 553.4, 378.8	201.83 3	>0.0007	¹⁷⁶ Lu(3.635 h) - 88.34, 1159.28, 1061.61
176.6 1	17.7 15	²⁵¹ Cf(898 y) - 227.0, 285.0, 61.5	201.83 3	6	¹⁷⁶ Ta(8.09 h) - 1159.28, 88.34, 1224.93
176.645 2	0.470 11	¹⁷⁴ Lu(142 d) - 272.918, 992.128, 76.471	202.21 5	†4.7 5	²²⁴ Rn(107 m) - 260.581, 265.806, 328.331
177.21402 6	22.16 8	¹⁶⁹ Yb(32.026 d) - 63.12077, 197.95788, 109.77987	202.38 7	†33.7 6	¹²⁹ Ba(2.16 h) - 182.32, 1459.1, 419.83
177.30 10	0.056 6	²⁵⁴ Es(39.3 h) - 211.80, 71.30, 104.70	202.51 3	97.3 4	⁹⁰ Y(3.19 h) - 479.17, 681.8
177.595 17	48.6 20	²⁰⁸ At(1.63 h) - 686.527, 660.040, 845.044	202.8 1	†30.8 10	²³⁰ Ra(93 m) - 72.0, 63.0, 469.7
177.7 2	6	²⁵¹ Bk(55.6 m) - 130.1, 152.8, 163.8	202.860 10	0.0580 21	¹²⁷ Te(9.35 h) - 417.95, 360.32, 215.17
177.7 2	2.4	²⁵¹ Es(33 h) - 152.8, 163.8, 34.0	202.860 10	68	¹²⁷ Xe(36.4 d) - 172.132, 374.991, 145.252
178.1 2	14.9 7	¹²³ Xe(2.08 h) - 148.9, 330.2, 1093.4	203.13 10	6.4 5	⁹⁰ Mo(5.56 h) - 257.34, 122.370, 323.20
178.4 2	0.025 3	²²⁰ Fr(27.4 s) - 413.0, 234.5, 44.60	203.2 5	74	¹⁰⁹ In(4.2 h) - 623.7, 1148.9, 426.25
179.4 1	8.7 7	²⁵⁷ Fm(100.5 d) - 241.0, 61.6, 104.4	203.818 3	20.6 20	¹⁵⁶ Sm(9.4 h) - 87.4897, 165.8452, 37.9681
179.636 15	0.532 12	¹⁰¹ Rh(4.34 d) - 306.857, 545.117, 127.226	204.10 6	40.8 23	¹⁹⁸ Au(2.27 d) - 214.841, 97.1949, 180.31
179.94 2	9.7 5	²⁴⁶ Pu(10.84 d) - 43.81, 223.75, 27.58	204.117 2	0.028 9	⁹⁵ Nb(34.975 d) - 765.794, 561.67
180.103 1	7.45 15	¹⁵³ Tb(5.32 d) - 86.545, 105.305, 262.322	204.117 2	2.33 7	⁹⁵ Nb(86.6 h) - 582.082, 786.198, 820.624
180.11 4	1.90 9	¹⁹⁵ Hg(9.9 h) - 779.80, 61.46, 585.13	204.117 2	63.25 13	⁹⁵ Tc(61 d) - 582.082, 835.149, 786.198
180.230 11	33.5 16	¹⁸² Os(22.10 h) - 510.056, 263.285, 55.506	205.0 10	36 4	²⁴⁶ Am(39 m) - 679.0, 152.9, 756
180.31 5	50 3	¹⁹⁸ Au(2.27 d) - 214.841, 97.1949, 204.10	205.309 2	5.01 5	²³⁵ U(7.038 10 ⁸ y) - 185.712, 143.764, 163.358
181.0 2	13.8 13	¹⁸⁴ Hf(4.12 h) - 139.1, 344.9, 41.4	205.79549 6	3.300 17	¹⁹² Ir(73.831 d) - 484.5780, 374.4852, 201.3112
181.063 8	5.99 7	⁹⁹ Mo(65.94 h) - 140.511, 739.50, 777.921	205.897 13	0.040 6	²⁴⁵ Bk(4.9 d) - 471.805, 164.8, 430.634
181.3 5	0.41 11	²⁵⁷ Md(5.52 h) - 371.4, 325.1, 388.5	205.93 5	>0.32	²²⁴ Ac(2.78 h) - 156.82, 140.7, 144.44
181.528 4	20.6 4	¹⁷² Lu(6.70 d) - 1093.657, 900.724, 810.064	206.17 5	50 5	²²² Fr(14.2 m) - 111.12, 242.11, 131.00
181.930 4	9.9 3	¹⁵⁸ Tb(180 y) - 944.09, 962.06, 79.5104	206.17 5	0.189 8	²²⁶ Th(30.57 m) - 111.12, 242.11, 131.00
182.11 3	77	¹³² Ce(3.51 h) - 155.37, 216.83, 190.04	206.50 4	58	¹⁷⁴ Ta(1.05 h) - 91.00, 1205.92, 1228.33
182.20 20	1.84 18	¹⁵⁷ Dy(8.14 h) - 326.16, 83.01, 60.82	207.4 3	14.0 8	¹⁷⁵ Ta(10.5 h) - 348.5, 266.9, 81.5
182.25 2	0.9 calc	¹³¹ Te(30 h)	207.801 5	4.9 3	¹⁶⁷ Ho(3.1 h) - 346.547, 321.336, 237.873
182.32 5	†100	¹²⁹ Ba(2.16 h) - 1459.1, 202.38, 419.83	207.801 5	41 6	¹⁶⁷ Tm(9.25 d) - 57.0723, 531.54, 264.9
184.285 1	17.45 16	¹⁶⁸ Tm(93.1 d) - 198.241, 815.990, 447.515	207.849 5	0.0080 16	¹⁸⁸ W(69.4 d) - 290.669, 227.083, 63.582
184.410 6	72.6 7	¹⁶⁶ Ho(1200 y) - 810.276, 711.683, 280.459	208.00 1	21.2 3	²³⁷ U(6.75 d) - 59.5412, 26.3448, 164.61
184.410 6	16.1 3	¹⁶⁶ Tm(7.70 h) - 778.817, 2052.36, 1273.540	208.08 3	1.14 9	¹⁶⁴ Tm(2.0 m) - 91.40, 1154.66, 768.91
184.564 4	3.37 6	¹⁵⁵ Dy(9.9 h) - 226.918, 1089.8, 1090.0	208.20597 11	8.732 12	¹⁹⁹ Au(3.139 d) - 158.3747, 49.82680
184.577 10	48.7 3	⁶⁷ Cu(61.83 h) - 93.311, 91.266, 300.219	208.20597 11	12.3 6	¹⁹⁹ Tl(7.42 h) - 455.46, 247.26, 158.37947
184.577 10	21.2 3	⁶⁷ Ga(3.2612 d) - 93.311, 300.219, 393.529	208.3664 5	11.0 6	¹⁷⁷ Lu(6.734 d) - 112.9498, 321.3162, 249.6741
184.810 25	0.0042 11	¹⁵⁴ Eu(8.593 y) - 81.99	208.3664 5	57.7 11	¹⁷⁷ Lu(160.4 d) - 228.4838, 378.5029, 418.5391
185.005 3	28.6 17	¹⁶⁷ Ho(67.0 m) - 1220.0, 282.864, 937.2	208.3664 5	0.94 8	¹⁷⁷ Ta(56.56 h) - 112.9498, 1057.8, 745.9
185.712 1	57.2 5	²³⁵ U(7.038 10 ⁸ y) - 143.764, 163.358, 205.309	208.8057 6	2.95 5	¹⁸³ Re(70.0 d) - 162.3219, 46.4839, 291.7238
185.85 3	1.89 4	¹⁸⁹ Re(24.3 h) - 216.663, 219.395, 245.09	209.753 2	3.42 5	²³⁹ Np(2.3565 d) - 106.125, 277.599, 228.183
186.05 1	4.8 3	²²⁶ Ac(29.37 h) - 253.73, 67.67	209.753 2	3.50 20	²³⁹ Am(11.9 h) - 49.10, 277.599, 228.183
186.05 1	0.0088 4	²³⁰ Th(7.538 10 ⁴ y) - 67.67, 143.87, 253.73	209.753 2	2.39 10	²⁴³ Cm(29.1 y) - 277.599, 228.183, 285.460
186.17 3	9.4 5	¹⁹³ Au(17.65 h) - 255.57, 268.22, 173.52	210.4 1	2.8	¹⁸⁶ Pt(2.2 h) - 689.4, 611.5, 635.3
186.211 13	3.59 6	²²⁸ Ra(1600 y) - 262.27, 600.66, 414.60	210.853 3	2.8 3	²²⁹ Th(7340 y) - 193.509, 86.40, 86.25
186.4 3	3.3 6	¹⁹² Hg(4.85 h) - 274.8, 157.2, 306.5			
186.718 2	27.8 12	¹⁹⁰ Re(3.2 h) - 119.12, 0			
186.718 2	52.4 21	¹⁹⁰ Ir(11.78 d) - 605.24, 518.55, 557.972			
186.718 2	66.3 6	¹⁹⁰ Ir(3.25 h) - 616.08, 502.53, 361.136			
187.1 5		²³⁹ Cm(2.9 h) - 146.4, 41			
187.1 5	0.060 15	²⁴³ Bk(4.5 h) - 536, 146.4, 41			
187.59 10	19.4 10	¹⁸⁸ Pt(10.2 d) - 195.05, 381.43, 423.34			
188.00 5	0.54 3	²²⁵ Ac(10.0 d) - 99.91, 150.04, 99.63			
188.01 4	0.00023 12	¹⁸⁴ Re(169 d) - 252.848, 216.548, 920.932			
188.27 3	37.4 17	¹⁹⁶ Au(9.6 h) - 147.81, 168.37, 285.49			
188.418 4	54	¹²³ Xe(16.9 h) - 243.378, 54.968, 453.796			
189.7 1	0.24 1	²⁴⁰ U(14.1 h) - 44.10, 66.5, 169.2			
189.82 6	0.193 12	²⁴³ Cm(8500 y) - 174.94, 132.99, 41.95			
190.04 5	2.67 12	¹³² Ce(3.51 h) - 182.11, 155.37, 216.83			
190.29 3	15.56 15	¹¹⁴ In(49.51 d) - 725.298, 558.456			
190.46 16	64.0 14	⁸¹ Rb(4.576 h) - 446.15, 510.31, 456.76			
191.2137 15	20.6 5	¹⁶⁹ Lu(34.06 h) - 960.622, 1449.74, 889.753			
191.437 10	3.7	¹⁹⁷ Pt(19.8915 h) - 77.351, 268.78			
191.437 10	0.632 21	¹⁹⁷ Hg(64.14 h) - 77.351, 268.78			
191.96 9	9.37 17	⁷² Zn(46.5 h) - 145.04, 16.4, 103.14			
192.349 5	3.08 10	⁵⁹ Fe(44.503 d) - 1099.251, 1291.596, 142.652			
193.509 4	4.4	²²⁹ Th(7340 y) - 210.853, 86.40, 86.25			

ملخص:

تهدف هذه الدراسة الى تقييم جودة الهواء في منطقة درارية في مجموع الجزيئات الهوائية الدقيقة (TSP) وما يرتبط بها من عناصر الاثر المعدني (ETM) في مدة حوالي تسعة (09) أشهر. أخذ عينات للجسيمات تم عن طريق مص الهواء بتدفق منخفض، بواسطة مرشحات مفتوحة وبدون فصل حجم معين. تبين الدراسة أن التلوث في هذه المنطقة الشبه الحضرية ليست مصدر قلق لأن 85.5% من القيم المسجلة كانت أقل من المعيار الجزائري. وقد اختيرت تقنية التحليل بالتنشيط النيوتروني للتقدير النوعي و الكمي للـ ETM المرتبطة بالجزيئات الهوائية الدقيقة، و تم الكشف عن خمسة وثلاثون (35) عنصر و معايرة خمسة و عشرون (25) عنصر. استنتجنا أن تلوث الهواء بـ ETM كان منخفضا نسبيا.

النمذجة بالذكاء الاصطناعي باستعمال شبكات الخلايا العصبية الاصطناعية قدمت أفضل النماذج من حيث الدقة والصلاحية مقارنة مع تقنيتنا النمذجة الأخرتان المستعملتان في هذه المذكرة. شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية المشكلة المقترحة قادرة على كشف، تقييم وتوقع تراكيز الـ ETM من خلال TSP وكذلك (TSP).

الكلمات المفتاحية: تلوث الهواء, TSP, ETM, النمذجة, شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية.

Résumé :

La présente étude porte sur l'évaluation de la qualité de l'air de la région de Drariïa par les Totales Particules en Suspension (TSP) et par les Eléments Traces Métalliques associés (ETM) pendant une période d'environ neuf (09) mois. Le prélèvement des particules est effectué par un échantillonneur à faible débit, la collecte d'aérosols est réalisée sur des filtres ouverts et sans coupure granulométrique précise. L'étude montre qu'en ce site semi-urbain la pollution n'est pas inquiétante vu que 85,5% des valeurs enregistrées étant inférieures à la valeur cible Algérienne. La technique d'Analyse par Activation Neutronique a été optée pour la quantification des ETM associés aux TSP, cependant nous avons détecté trente cinq (35) ETM dont vingt cinq (25) ont été dosés. Nous avons constaté que la pollution atmosphérique en ETM est relativement faible.

La modélisation par intelligence artificielle basée sur les réseaux de neurone artificiels a donné les meilleurs modèles en termes d'exactitude et validation par rapport aux deux autres techniques de modélisation optés dans ce mémoire. Le réseau de neurones artificiels combiné proposé était capable de détecter, estimer et prévoir en un seul coup les TSP ainsi que les ETM à partir des TSP.

Mot clés : Pollution atmosphérique, TSP, ETM, Analyse par Activation Neutronique, Modélisation, réseaux de neurones artificiels.

Abstract:

The present study relates to the evaluation of the quality of the air of the area of Drariïa in Total Particles in Suspension (TSP) and Element Metal Traces associated (ETM) for one period with approximately nine (09) months. The sampling away of the particles is carried out by a sampler with low flow; the collection of aerosols is carried out on open filters and without precise granulometric cut. The study shows that in this semi-urban site, pollution is not worrying considering 85,5% of the recorded values were lower than the Algerian target value. The technique of Neutron Activation Analysis was chosen to quantificate the ETM associated with the TSP; however we detected thirty five (35) ETM of which twenty five (25) were quantified. We noted that the ETM's air pollution is relatively weak.

Modelling by the artificial intelligence based on the neural networks gave the best models in terms of exactitude and validation compared with the two other techniques of modelling chosen in this study. The neural network combined proposed was able to detect, estimate and to predict into only in one time TSP and ETM starting from TSP.

Keywords : Air pollution, TSP, ETM, Neutron Activation Analysis, Modelling, Artificial Neural network.