

Analyse Spatiale de la Pollution Particulaire au niveau de la Ville de Meknès (Maroc)

[Spatial Analysis of Particulate Air Pollution in Meknes City (Morocco)]

Imane BOULARAB¹, Ibrahim ELGHAZI¹, Omar MOUHADDACH¹, Marie-Paule KESTEMONT², and Samir EL JAAFARI¹

¹Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences de Meknès, Maroc

²Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

Copyright © 2015 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The particulate air pollution may be natural or anthropogenic, with different shapes and diameters of particles. What allow them to reach the lung and the blood increasing not only respiratory and cardiovascular disease but also the risk of mortality. To eliminate the particulate air pollution in a city such as Meknes, the study of the air pollution distribution in the urban area seems necessary. And as the mapping is the most suitable way for a good spatial representation, we had used geostatistics, which permits the characterization of the spatial variability of any property and, its estimate turns out to be very appropriate to map the phenomenon of dispersion. The maps obtained from of two interpolation methods, the deterministic method: IDW (Inverse distance weighting) and the geostatistical technique: Kriging, show that all districts of the Meknes city suffer from a large dust with different degrees, and that particulate air pollution in Meknes is not limited to the border area of pollution sources but it is characterized by the invasion of other areas (action of prevailing winds).

KEYWORDS: Particule pollution, GIS, interpolation, IDW, Kriging.

RÉSUMÉ: La pollution de l'air par les particules peut être d'origine naturelle ou anthropogénique, ces particules sont de types et diamètres différents. Ce qui leur permet d'atteindre les alvéoles pulmonaires puis le sang, en provoquant non seulement de maladies respiratoires et cardio-vasculaires, mais elles peuvent aussi augmenter le risque de mortalité. Afin de lutter contre la pollution atmosphérique due aux particules dans une ville comme Meknès, une étude sur la distribution de cette pollution semble nécessaire. Et, comme la cartographie constitue le moyen le plus adapté pour une bonne représentation spatiale, nous avons fait appel aux outils de la géostatistique pour cartographier ce phénomène de dispersion. Les cartes obtenues suite à l'utilisation de deux méthodes d'interpolation: La méthode déterministe : IDW (Pondération par l'inverse de la distance) et La technique géostatistique : Krigeage, montrent que tous les quartiers de la ville de Meknès souffrent d'un empoussièrément important avec des degrés différents, et que la pollution atmosphérique particulière à Meknès ne touche pas seulement la zone limitrophe des sources de pollution mais elle est caractérisée par l'envahissement des autres zones (action des vents dominants).

MOTS-CLEFS: Pollution particulaire, SIG, interpolation, IDW, Krigeage.

1 INTRODUCTION

En environnement, on désigne par particules, des altéragènes microscopiques sous forme d'agrégats de matière de différents types et diamètres, et qui peuvent être d'origine naturelle ou anthropogénique, primaire ou secondaire. Ce qui leur permet d'atteindre les alvéoles pulmonaires puis le sang en causant non seulement des maladies respiratoires, et cardio-

vasculaires mais elles peuvent aussi augmenter le risque de mortalité, même à de très faibles doses principalement pour des expositions à long terme [1].

Ces particules respirables, sont dispersées par l'action et la turbulence du vent et le mouvement de convection, d'où l'ampleur de la variation des niveaux de polluants dans l'air d'un endroit à l'autre, et, l'envahissement des endroits géographiquement loin de toute source de pollution particulaire [2].

Tout cela rend de ce type de pollution, un phénomène qui mérite d'être surveillé. Cependant, et dans une ville comme Meknès dont la population dépasse de loin un demi-million d'habitants, aucun réseau de surveillance n'est mis en place, Nonobstant la présence de cette pollution au niveau de la ville [3], [4].

Dès lors, afin de lutter contre la pollution atmosphérique due aux poussières dans la ville de Meknès, une étude sur la distribution de cette pollution dans l'espace urbain semble nécessaire pour une gestion efficace de ce type d'environnement.

Et, comme la cartographie constitue le moyen le plus adapté pour une bonne représentation spatiale. Nous avons fait appel à la géostatistique qui est une approche caractérisant la structure de la variabilité spatiale d'une propriété quelconque ainsi que son estimation s'avère être très appropriée pour cartographier un phénomène naturel [5]. Pour cela, nous allons nous servir de ces techniques de géostatistiques associées aux systèmes d'informations géographiques pour établir une représentation spatiale de la dispersion des particules au niveau de la ville de Meknès.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Sur le plateau de Saïs, entre le Moyen-Atlas au Sud et les collines pré-rifaines au Nord, s'installe une des quatre villes impériales du Maroc « Meknès ». Dans la partie septentrionale du Maroc, à une altitude de 560 m, cette ville bénéficie d'un climat à tendance méditerranéenne, dont ses coordonnées sont 33° 53' 42" Nord, 5° 33' 17" Ouest [6].

La zone d'étude est située à 150 km à l'Est de Rabat et à 60 km à l'Ouest de Fès, elle se présente comme un carrefour de routes entre le Nord et le Sud, l'Est et l'Ouest, et, un chef-lieu de la région administrative de Meknès-Tafilalet.

Meknès est caractérisée par un aspect géographiquement éclaté dû à la traversée de trois oueds : au centre, l'oued Boufekrane qui sépare la ville ancienne de la ville nouvelle, à l'Est l'oued Ouislane, et à l'Ouest l'oued Bouishak. Et, avec une population estimée à environ 650 000 habitants, elle occupe le sixième rang au Royaume [7].

La démarche méthodologique consiste à adopter les méthodes d'interpolation associées au système d'information géographique, en vue de cartographier la dispersion de la pollution atmosphérique particulaire au niveau de la ville de Meknès en exploitant les données d'une campagne de mesures de poussières.

2.2 SOURCE DES DONNÉES

Les mesures de poussières au niveau de la ville de Meknès, sont issues d'un travail de recherche portant sur l'étude de la pollution de l'air par les poussières à la ville de Meknès [8]. Ces mesures sont réalisées conformément à la norme NFX43-007 à l'aide des plaquettes « DIEM » qui sont des supports métalliques enduit d'un fixateur en silicone. Cette méthode a permis de quantifier les poussières en g/m²/mois, au niveau de 14 points d'échantillonnages durant la période 11/05/09 au 10/06/09 (Cf. Fig.1).

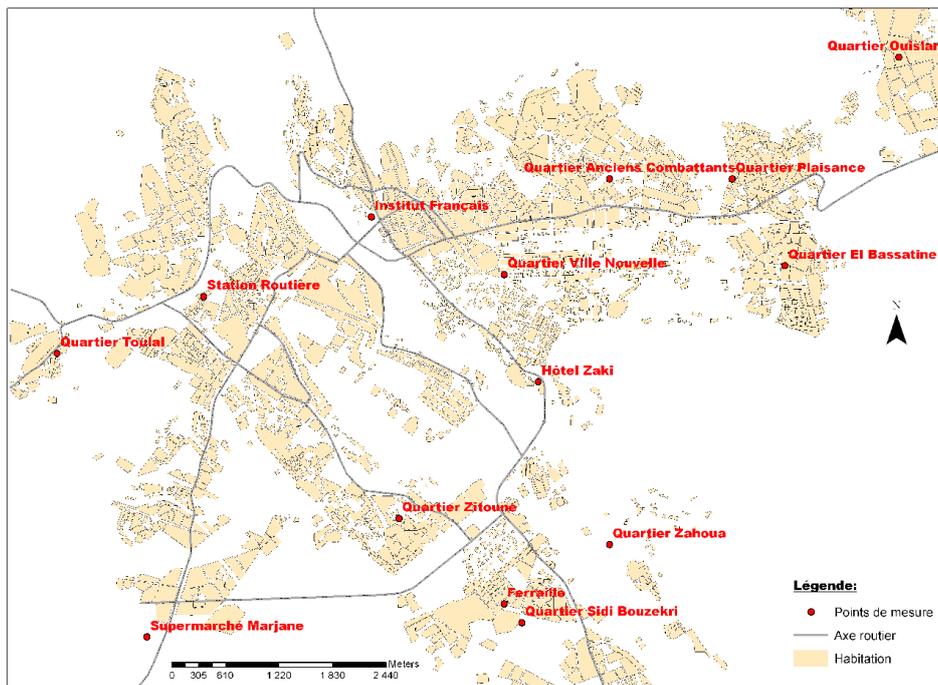


Fig.1. Localisation des points de mesures au niveau de la ville de Meknès

Les couches SIG correspondant aux principaux axes routiers, les zones industrielles et les quartiers de la ville de Meknès, sont numérisées à partir d’un plan urbain de la ville à l’échelle de 1:10.000, élaboré par la Direction du Cadastre et de la Cartographie au Ministère de l’Agriculture et du Développement Rural et des Eaux et Forêts.

2.3 ANALYSE DES DONNÉES : INTERPOLATION & CARTOGRAPHIE

Les méthodes d’interpolation permettent de prédire les valeurs des cellules dans un raster qui correspondent à des sites non échantillonnés à partir d’un nombre limité de points d’échantillonnage [9]. Les deux méthodes d’interpolation adoptées pour notre analyse sont : (i) la pondération par l’inverse de la distance (IDW) qui se base sur un algorithme purement déterministe, et (ii) le krigage qui s’appuie sur une modélisation probabiliste du phénomène étudié.

La cartographie des résultats des deux méthodes d’interpolation est réalisée, suite à une reclassification de leurs produits suivant la classification AirFobep (Cf. Tableau 1). Cette dernière permet une évaluation du degré de la pollution par particules, en proposant cinq classes allant d’empoussièremment faible jusqu’au empoussièremment exceptionnel [10].

Tableau 1. Degrés de pollution particulaire (Classification AirFobep)

Quantité de poussières (en g/m ² /mois)	Degré de pollution
< 4,5	Empoussièremment faible
4,5 - 7,5	Empoussièremment moyen
7,5 - 10,5	Empoussièremment fort
10,5 – 30	Gène importante
> 30	Empoussièremment exceptionnel

En examinant les résultats d’interpolation qui varient de 10 g/m2/mois à 42 g/m2/mois, il s’est avéré important d’adopter de nouvelles classes pour une meilleure présentation cartographique des différents degrés de la pollution de la ville en matière de pollution particulaire. Ci-après un tableau résumant cette nouvelle classification.

Tableau 2 : La nouvelle classification adoptée pour la cartographie

Quantité de poussières (g/m ² /mois)	Degré de pollution	
7,5 - 10,5	Empoussièrément fort	
10,5 – 17	1 ^{er} Ordre	Gène importante
17 - 23,5	2 ^{ème} Ordre	
23,5 – 30	3 ^{ème} Ordre	
30 – 34	1 ^{er} Ordre	Empoussièrément exceptionnel
34 – 38	2 ^{ème} Ordre	
> 38	3 ^{ème} Ordre	

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

La représentation spatiale de la pollution particulaire permet la détection des zones critiques en évitant la ponctualité géographique de l'information. Pour y arriver, nous faisons appel à l'interpolation, ce qui permet de restituer des champs continus à partir de variables mesurées ponctuellement [11]. La limite majeure de ces méthodes concerne le manque des données de mesures fournies par les réseaux d'observation [12]. Dans notre étude, ce manque est comblé par le nombre élevé des points de mesure (14) qui dépasse de loin, le nombre minimal de points de prélèvement pour les mesures de la pollution particulaire allant de 2 à 3 pour une telle agglomération urbaine [13].

Au niveau de la ville Meknès (Cf. Fig 2), la pollution particulaire urbaine due aux poussières est caractérisée par une variabilité géographique, avec des zones à forte concentration particulaire (en rouge), entourées par un gradient décroissant, cette dispersion se fait vers des directions différentes dont les plus dominantes sont vers l'Est et le Nord-est.

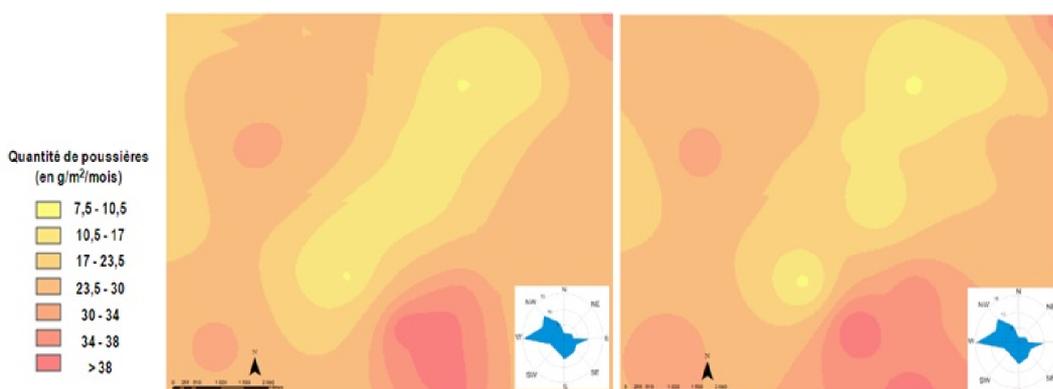


Fig.2. Cartes de dispersion des poussières au niveau de la ville de Meknès, par krigage (gauche) et IDW (droite)

Ce qui peut être expliqué par l'influence du vent, vu que nombreux études ont confirmé le grand effet de la direction du vent sur la dispersion des polluants atmosphérique [2], [14], [15], [16]. Et, selon, la direction de la météorologie nationale, les vents dominants à Meknès sont de deux types : Le premier type de vent est chaud et sec, « le Chergui » qui vient de l'Est et du Sud-Est alors que le second est froid et humide « le Rharbi » qui vient de l'Ouest et du Nord Ouest, qui est le plus fréquent avec 33.6 % de nombre de cas (Cf. Tab.3). En effet, ces données sont cohérentes et explicatives à la distribution observée (Cf. Fig.2).

Table 1. Tableau 3. Répartition de la direction des vents en % de nombre de cas à Meknès

Directions	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
%	2.4	1.3	1.8	3.0	8.5	4.4	5.0	5.3	6.3	4.8	4.7	5.1	14.4	9.2	10.0	5.9

Source : Direction de la météorologie nationale

En effet, les quantités des particules retrouvées dans les points de mesure varient de 10 à 42 g/m²/mois ce qui correspond selon la classification AirFobep à trois degrés principaux de pollution, à savoir: « empoussièrément fort », « gêne importante » et « empoussièrément exceptionnel » [10].

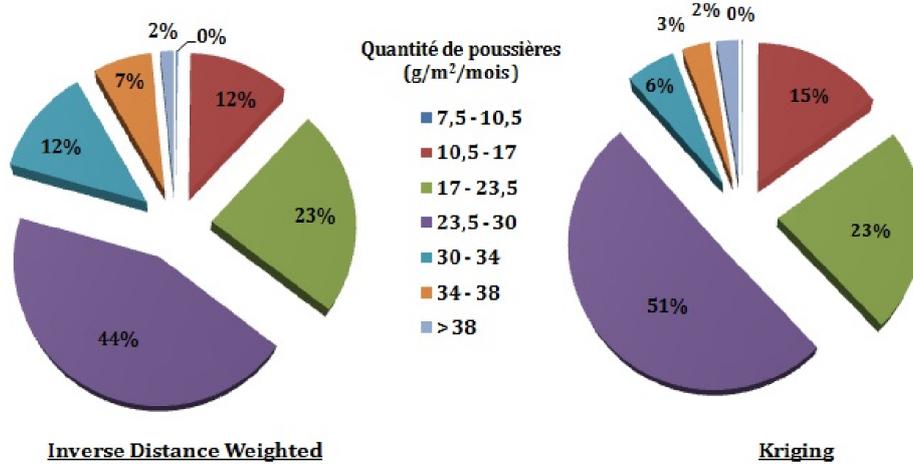


Fig.3. Pourcentage des classes par type d'interpolation IDW (gauche) et krigeage (droite)

La figure 3 indique le pourcentage des nouvelles classes adoptées (cf. Tab.2). Pour les deux méthodes, 2% de la surface interpolée est supérieure à 38 g/m²/mois ce qui correspond à une pollution du degré «empoussièrément exceptionnel du troisième ordre », 72% à 75% de la surface interpolée est située entre 10,5 à 30 g/m²/mois signifiant une pollution du degré «gêne importante», dont un peu près de 50% de la surface interpolée est caractérisée par une gêne importante du troisième ordre, 23% par une gêne importante du 2^{ème} ordre, et, de 12% à 15% par une gêne importante du 1^{er} ordre. Alors que pour les surfaces à empoussièrément exceptionnel du premier et deuxième ordre, on remarque une différence entre les résultats issus des deux méthodes : de 3% de la surface interpolée qu'est caractérisée par un empoussièrément exceptionnel du deuxième ordre par le Kriging, à 7% par l'IDW, et, de 6% par Kriging à 12% par l'IDW pour la surface caractérisée par un empoussièrément exceptionnel du premier ordre.

Ces résultats dévoilent la forte contribution des poussières dans la pollution atmosphérique dont la ville de Meknès souffre.

Les études menées dans trois sites spatialement éloignés au niveau de la ville de Meknès, et de différentes natures[4], [17]: L'avenue des FAR et Bab Mansour qui sont principalement des axes routiers, et, la rue Riad dans le quartier résidentiel Ouisslane, limitrophe d'une grande cimenterie.

Les résultats obtenus [17] montrent que le taux le plus élevé des poussières est à rue Riad avec une concentration de 761 µg/m³ suivi par Bab Mansour avec une valeur de 425 µg/m³, et Avenue des FAR avec 270 µg/m³.

De même, d'autres formes de particules envahissent la zone d'étude, tels que les particules en suspension (PES). L'analyse chimique des PES pour lesdits sites [4] montre que le Zn, le Mn et le Fe restent les éléments les plus abondants pour les trois sites, suivis du Cu et Cr dont les concentrations sont significatives. Et, finalement le Co et Ni présentent les teneurs les plus faibles. Pourtant cette faible teneur en Ni dépasse les normes européens et celles de l'OMS. Ainsi que la concentration moyenne annuelle des PES détectées à Meknès, à savoir : 75,38 µg/Nm³ [3], ce qu'est est très largement au dessus de l'objectif de qualité (30 µg/m³/an) et la valeur limite (40 µg/m³/an) de la directive européenne [18], [19], [20] ainsi que de la valeur guide de l'OMS fixée à 20 µg/m³/an [21]. Elle est très voisine de la valeur limite tunisienne (80 µg/m³/an) [22] est très inférieure à de la norme marocaine (200 µg/Nm³) [23].

Quant à la dispersion par rapport aux sources de la pollution par les poussières, les deux cartes de la figure 4 dévoilent une forte contribution des sources ponctuelles (zones industrielles) et linéaires (axes routiers) dans la pollution étudiée sauf pour la zone industrielle qui se trouve au Nord, ce qui peut être expliqué par l'influence du vent sur la dispersion de ces particules.

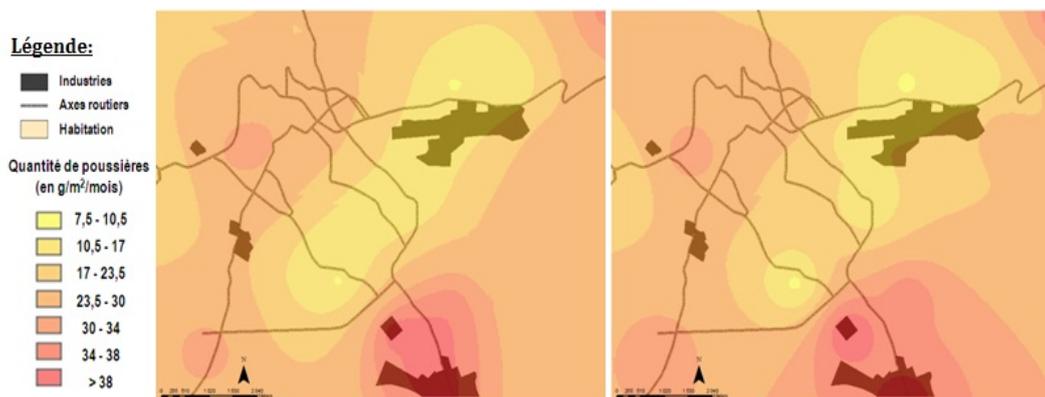


Fig.4. Cartes de dispersion des poussières par rapport aux sources de pollution au niveau de la ville de Meknès, par krigage (gauche) et IDW (droite)

Selon, le profil environnemental de Meknès, deux types de sources de la pollution particulaire sont impliquées [6]:

- L'industrie : Les industries chimiques et para-chimiques, et, les industries de matériaux de construction et à leur tête les briqueteries et la cimenterie Lafarge.
- Le transport : Dans cette zone urbaine se concentre environ 89 % du parc automobile de toute la région Meknès-Tafilalet, en plus de l'état vétuste du parc automobile.

Une analyse plus profonde sur l'identification des sources des particules atmosphérique au niveau urbain de Meknès via la caractérisation de la morphologie et la micro-analyse des particules confirme l'implication du trafic routier et l'industrie de ciment dans ce type de pollution mais soupçonne aussi le trafic ferroviaire et les sources naturelles notamment l'érosion du sol [3].

Ces résultats concordent avec ceux de Carré et ses collaborateurs [24] qui ont remarqué que 50% des émissions des particules étudiées, sont dues aux procédés industriels, 25 % aux sources mobiles et 25% aux combustions, ainsi qu'avec l'étude réalisée à la ville de Salé (Maroc) qui a mis en évidence que la part la plus importante des matières particulières a été trouvée dans les sites industriels [25].



Fig.5. Cartes d'interpolations de poussières par rapport aux sources de pollution et des habitations au niveau d ville de Meknès, par krigage (gauche) et IDW (droite)

Malgré qu'il n'y ait pas une relation nette entre la concentration des habitations et les zones à pollution particulaire intense, on constate, selon la figure 5 qu'une grande partie de ces agglomérations se situent dans des endroits à empoussièremment exceptionnel. Ce qui permet de déterminer les zones à risques où les agglomérations subissent une exposition élevée.

D'après ces résultats, l'impact de cette pollution sur les citoyens, est subsistant, il peut se traduire généralement par un ensemble des altérations de santé. De nombreuses études internationales et nationales ont déjà établi le lien entre la pollution de l'air due aux particules et l'incidence de certaines maladies respiratoires et cardiovasculaires ainsi que la mort prématurée [26].

Au Maroc, l'étude de Safi a montré l'existence d'une corrélation significative entre les syndromes bronchiques et les particules [27]. Quant à l'étude Mohammedia-Airpol, elle confirme aussi l'impact sanitaire de la pollution de l'air sur la population et plus particulièrement sur les enfants asthmatiques [28].

Ceci a été confirmé par une étude sur l'évaluation des risques de la pollution urbaine pour la santé, menée en Ile-de-France, qui a rapporté qu'en hiver, 15 % des visites pour asthme chez les enfants sont en relation avec la pollution particulaire [29].

4 CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté une étude sur la dispersion spatiale des particules dans l'air au niveau de la ville de Meknès, en interpolant des données issues d'une campagne de mesure par deux méthodes d'interpolation (Krigage et IDW).

Par approche spatiale, les deux méthodes montrent que les zones soumises à des degrés élevés de pollution due aux particules sont généralement celles qui accueillent des sources d'émission ou des infrastructures favorisant l'émission des particules notamment les sources ponctuelles et linéaires. Les résultats trouvés montrent ainsi, que la direction du vent influence le courant de polluants dans l'atmosphère, en favorisant une dispersion vers l'Est et le Nord-est.

L'utilisation de la géostatistique nous a permis de montrer que la ville de Meknès souffre d'une remarquable pollution à caractère envahissant et de souligner ses probables répercussions sur l'environnement avec toutes ces composantes vivantes et inertes. Ce qui dévoile la forte nécessité de prendre des mesures et des actions tels que la mise en place d'un réseau de stations pour la surveillance de la qualité de l'air, *a fortiori*.

REFERENCES

- [1] Association pour la Surveillance et l'Étude de la Pollution Atmosphérique en Alsace (ASEPAA), Étude diagnostique sur l'évaluation de la pollution par les particules fines et leurs constituants, intégrant les méthodes de bio-indication et de bio-accumulation en Alsace, 2001.
- [2] Michelot N., l'influence des Topoclimats sur la pollution de l'air aux particules dans le sud-ouest des Alpes-Maritimes, Thèse doctorale Université de Nice Sophia-Antipolis, 2014.
- [3] Ait Bouh H., Benyaich F., Noack Y., Bounakhla M., Tahri M., Physical and chemical characterization of suspended atmospheric particles and source identification in town of Meknes in Morocco, J. Mater. Environ. Sci. 3 (3), 434-445, 2012.
- [4] Ait Bouh H., Benyaich F., Bounakhla M., Noack Y., Tahri M., Zahry F., Variations Saisonnières des particules atmosphériques et ses composants chimiques dans la Ville de Meknès- Maroc, J. Mater. Environ. Sci. 4 (1), 49-62. 2013.
- [5] Rossi J-P., Lavelle P., Tondoh J.E., "Statistical tool for soil biology X. Geostatistical analysis. European Journal of Soil Biology", 31:173-181, 1995.
- [6] Abdouh M., El Atrouz A, Mechkouri A, profil environnemental de Meknès, 94p, 2004.
- [7] Sai M., Kestemont M-P., El Jaafari S., L'implémentation d'un système de management environnemental: Cas de la commune urbaine de Meknès (Maroc), Editions Universitaires Europeennes, 196p, 2014.
- [8] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Centre de ressource ArcGIS, Bibliothèque online d'aide ArcGIS10.0, [web], Adresse URL : <http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html>, consulté le 11 juin 2014
- [9] Ouhakki, Étude de la pollution de l'air de la ville de Meknès par les poussières: Cas des poussières de la cimenterie LA FARGE-ciment Meknès, Mémoire de Master, Université Moulay Ismail. Meknès-Maroc, 130p, 2009.
- [10] Association pour la surveillance de la qualité de l'air de la région de l'Étang de Berre et de l'Ouest des Bouches du Rhône (Airfobep), Les particules sédimentables sur la zone de l'étang de Berre, Rapport d'étude sur la qualité de l'air, 33p, 2004.
- [11] Joly D., Densité des points de mesure, types et limites des modèles d'interpolation, Climat et société : Mesures et modèles, 65p, 2007.
- [12] Ung A., Ranchin T., Wald L., Weber C., Hirsch J, Perron G., Kleinpeter J., Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg. PhotoInterprétation, n° 3/4, pp. 53-64, 2000.

- [13] François Mathe, Evolution de la classification et des critères d'implantation des stations de mesure de la qualité de l'air - participation à la réactualisation du guide de classification des stations, Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, 84p, 2010.
- [14] Mahjoub Said N., Mhiri H., El Golli H., Lepalec G., Influence de l'Orientation de la Vitesse du Vent sur la Dispersion d'un Polluant autour d'un Bâtiment, Rev. Energ. Ren. Vol. 4, 107-123, 2001.
- [15] Carrega P., Le vent: Importance, mesures, modélisation et tribulations, Bulletin de la Société géographique de Liège, 51, 17-29, 164p, 2008.
- [16] Kumar P., Fennell P., Britter R., Effect of wind direction and speed on the dispersion of nucleation and accumulation mode particles in an urban street canyon, Science of The Total Environment, Volume 402, Issue 1, Pages 82-94, 2008.
- [17] Association pour la surveillance de la qualité de l'air de la région de l'Étang de Berre et de l'Ouest des Bouches du Rhône (Airfobep), La qualité de l'air en région Midi-Pyrénées. Rapport annuel, 72 p, 2008.
- [18] Parlement européen, Directive 2004/107/CE du parlement européen et du conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant. Journal Officiel de l'Union Européenne, N° 23, 3-16, 2005.
- [19] Sammut M., Spéciation du cadmium, du plomb et du zinc dans les poussières d'émissions atmosphériques d'origine sidérurgiques. Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne Aix Marseille III, 262 p, 2007.
- [20] World Health Organization (WHO), Guidelines for air quality. Geneva, 2000.
- [21] Elichegaray D., Bouallala S., Colosio J., Desqueyroux H., Galsomiès L., Pernin H., Poisson N., Stroebel R., La qualité de l'air en France - tendances et perspectives. ADEME/Département surveillance de la qualité de l'air, 16 p, 2003.
- [22] Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement Secrétariat d'État Chargé de l'Environnement, Pollution atmosphérique au Maroc, situation en 2002, 45 p, 2003.
- [23] Carré J., Blanchard J-M., Popescu J., Analyse et traitement physicochimique des rejets atmosphériques industriels, pages 14-15-19-666-676-788-796-797, 1998.
- [24] Barro B., "Approche de conception et de réalisation d'un système d'information géographique (SIG) en pollution atmosphérique : cas de la qualité de l'air des villes de rabat et de Salé ", Projet de fin d'étude, École Mohammadia d'ingénieurs, Rabat-Maroc, 85p, 2000.
- [25] Banque Mondiale, Évaluation du coût de la dégradation de l'environnement, Royaume du Maroc, 2003.
- [26] Ministère de la santé, Étude de la pollution atmosphérique de la population de Safi, 1998.
- [27] Ministère de l'Aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'Habitat et de l'environnement et Ministère de la santé, Mohammedia-Airpol : Étude de la pollution atmosphérique et de son impact sur la santé des enfants asthmatiques de Mohammedia, 2002.
- [28] Médina S., Le Tertre A., Quénel P., Le Moullec Y., Lameloise P., Guzzo JC., et al., ERPURS : analyse des liens à court terme entre pollution atmosphérique et santé", Paris : ORS île-de-France, 1997.