



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Département des Sciences de la Terre



Laboratoire de Géorressources
Unité associée au CNRST (URAC 42)



Direction de la Météorologie
Nationale

Master Sciences et Techniques Eau et Environnement



Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Pollution particulaire dans la Région du Grand Casablanca :
Etude de Benchmarking et modélisation cartographique

Par

LIMANE NORA

Sous la direction de :

Pr. A. RHOJJATI (FSTG)
Mme. B. ELJOHRA (DMN)
Mr. R. ABBOUBI (DMN)

Soutenu le 13 juin devant la commission d'examen composée de :

- | | | |
|------------------------|-----------------|--------------|
| - Pr. A. RHOJJATI | FSTG, Marrakech | Encadrant |
| - Mme. B. ELJOHRA | DMN, Casablanca | Co-Encadrant |
| - Mr. R. ABBOUBI | DMN, Casablanca | Co-Encadrant |
| - Pr. A. BENKADDOUR | FSTG, Marrakech | Examineur |
| - Pr. M. L. EL HACHIMI | CRMEF, Rabat | Examineur |

2014/2015

Dédicace

À toute ma famille

À tous mes amis

*À tous ceux et celles qui m'ont marqué
par un geste, un mot ou un état d'esprit,*

Je dédie ce modeste travail.

Nora LYMANE

REMERCIEMENTS

Avant de commencer la présentation de ce travail, je profite de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail ainsi qu'à la réussite de mon cursus universitaire.

Je tiens à exprimer ma sincère et profonde reconnaissance à Mme Bouchra ELJOHRA et Mr Rachid ABBOUBI pour m'avoir accueillie dans leur service de l'environnement et de biométéorologie au sein de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), pour tout le temps qu'ils m'ont consacré, pour leurs directives précieuses, et pour la qualité de leur suivi durant toute la période de mon stage malgré leur charges professionnelles.

Mes sincères remerciements vont également au Professeur Ali RHOUJATTI responsable du Master sciences et techniques de l'eau et l'environnement qui m'a donnée l'opportunité d'être parmi les étudiants et de bénéficier d'une formation riche et spéciale, et aussi pour avoir accepté d'encadrer mes travaux durant la période de mon stage, pour sa disponibilité, et sa générosité et pour avoir eu l'amabilité de partager son savoir faire avec une toute particulière sympathie.

A l'ensemble je tiens à témoigner mon profond respect et gratitude en espérant qu'ils trouveront dans cet ouvrage l'expression de ma considération et le témoignage de mon estime.

Mes remerciements vont à tout le personnel de la DMN pour leur collaboration, leur générosité et leur disponibilité sans oublier les membres du jury pour leur bienveillance à vouloir évaluer mon travail.

Mes remerciements vont enfin à ma famille qui m'a toujours soutenue, et en particulier, mes parents pour leur patience, leur générosité, leur discernement et leur soutien sans faille.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée pour mes collègues de stage. Merci à tous pour votre bonne humeur, vos encouragements et votre soutien.

Résumé

La surveillance de la qualité de l'air demeure une préoccupation nationale primordiale qui consiste en un suivi spatio-temporel d'un certain nombre de paramètres indicateurs de la pollution afin de situer le niveau de la qualité de l'air par rapport à des normes fixées par la réglementation en vigueur. Ainsi le Maroc donne de l'intérêt à la surveillance de la qualité de l'air à travers son réseau national géré par la DMN.

Quelle est donc la situation de l'organisme marocain en charge de la surveillance de la qualité de l'air par rapport aux autres organismes à l'étranger ? Quels sont ces moyens et ces produits ? Et quelle amélioration pourrait-on s'inspirer des autres organismes étrangers ? Concernant la modélisation cartographique de la dispersion atmosphérique comme étant l'un des moyens majeurs qui existent au sein de la DMN, comment cet outil permet de cibler la zone pour laquelle on devra prendre des mesures sanitaires ou environnementales en fonction des niveaux de contamination calculés ?

Le présent travail répond à ces questions via les résultats de l'étude menée par les différentes approches utilisées (benchmarking, modélisation cartographique...etc.).

Dans un premier lieu, un benchmark entre certains organismes étrangers en charge de la surveillance de la qualité de l'air et la DMN de point de vue gouvernance, moyens utilisés, produits fournis ainsi leur communication. Cette comparaison a permis de proposer des améliorations sous forme de recommandations.

En deuxième lieu de ce travail, une application de la modélisation cartographique de dispersion atmosphérique sur la RGC pour les PM10 pendant l'année 2014. Des simulations de dispersion sur 1 heure, 24 heures et les moyennes annuelles des PM10 pendant 2014 ont été réalisées avec le modèle AERMOD.

Enfin, la comparaison de la simulation du modèle pendant 2014 avec celle du 2010 a montré que le niveau de la pollution particulaire a sensiblement diminué pendant 2014 par rapport à 2010. De plus la confrontation des résultats du modèle et les stations automatiques au niveau de la RGC, a permis de lever la nécessité de réaliser un inventaire des émissions atmosphériques plus avancé, qui inclut toutes les sources de la pollution particulaire que ça soit naturelle ou anthropique afin d'exploiter toutes les fonctionnalités offertes par le modèle.

Liste des abréviations

AASQA: Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air

AERMIC: AMS–EPA Regulatory Model Improvement Committee

AERMOD: AERMIC Dispersion Model

ANPE : Agence Nationale de Protection de l'Environnement

AQI: Air Quality System (USA)

BMW: Bade-Wurtemberg

BPIPPRM: Building Profile Input Program for PRIME

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CITET : Centre International des Technologies de l'Environnement de Tunis

CLC : Couche Limite Convective

CLS : Couche Limite Stable

CTM: Centrale Thermique de Mohammedia

DEFRA: Department for Environment, Food and Rural Affairs

DEM : modèle numérique d'élévation

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

EMEP : Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherches (Suisse)

FAM : Fonderies et Aciéries du Maroc

GC/ FID: Gas Chromatography – Flame Ionization Detector

GSL : Grandes source linéique

GSP : Grande Source Ponctuelle

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HS : hauteur de séparation

INS : inventaire national spatialisé

LAI : Landesausschuß für Immissionschutz (commission du Bund et des Länder pour la protection contre les Immissions, Allemagne)

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

LMO : longueur de Monin-Obukhov

LUBW: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

MOH PREF: Mohammadia préfecture

NABEL: réseau national d'observation des polluants atmosphériques (Suisse)

NILU: Norsk Institut for Luftforskning

NUPS : système léger de prélèvement actif sur batterie

OFEV : Office Fédéral de l'Environnement

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONCF : Office National des Chemins de fer

OPair : Ordonnance sur la Protection de l'Air (Suisse)

PM1: Particular Matter 1 μ m

PM2, 5: Particular Matter 2.5 μ m

PM10: Particular Matter 10 μ m

RGC: Région du Grand Casablanca

R.N.S.Q.A : Réseau national de la surveillance de la qualité d'air (Tunisie)

SAMIR : Société Anonyme Marocaine de l'Industrie du Raffinage

SLIN : Sources Linéiques

SSURF : Sources Surfaique

SVOL : Sources volumiques

UBA: Umweltbundesamt

US EPA: United States Environmental Protection Agency

VDI : Cercle des ingénieurs allemands

ZAG : Zone Agglomération

ZI: Zone Industrielle

ZUR : Zone URbaine régionale

ZR: Zone Régionale

Liste des figures

Figure 1 : Organisation de la surveillance de la qualité de l'air en Allemagne	17
Figure 2 : Organisation des pouvoirs en matière de qualité de l'air en USA.....	18
Figure 3 : Zones de surveillance de l'ozone en Autriche	20
Figure 4 : Zonage de la surveillance de la qualité de l'air en Suisse	21
Figure 5 : Zones de surveillance de la qualité d'air en Tunisie	21
Figure 6 : Zonage du territoire français dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air	22
Figure 7 : L'affichage des données par stations et par polluants	30
Figure 8 : Données de la qualité d'air au niveau du site de l'EPA	31
Figure 9 : Valeurs annuelles des PM10 avec AQI au niveau de Jefferson	32
Figure 10 : Représentation de données journalières de la qualité d'air	33
Figure 11 : Panneau lumineux d'information sur la qualité de l'air	35
Figure 12: situation géographique du Grand Casablanca.....	41
Figure 13 : Localisation des stations météorologiques	43
Figure 14 : Normales des températures maximales et minimales et des précipitations sur 30 ans pour les stations de Nouasseur et Casa-Anfa	43
Figure 15 : Evolution du parc automobile de la RGC entre 2006 et 2014.....	44
Figure 16 : Infrastructures portuaire et aéroportuaire	46
Figure 17 : Répartition des grandeurs industrielles par préfectures et provinces	47
Figure 18 : Les Situations de stabilité et instabilité atmosphériques	55
Figure 19 : Brise de mer et de terre	56
Figure 20 : Brise de compagne.....	56
Figure 21 : Structure du système de modélisation	59
Figure 22 : Evolution typique de la stabilité de la CLA au cours d'une journée	62
Figure 23 : Plan d'exécution du modèle	71
Figure 24 : Topographie du domaine d'étude	74
Figure 25 : Grille des récepteurs utilisés pour les calculs des concentrations	75
Figure 26 : Sources modélisées	76
Figure 27 : Rose des vents de l'année 2014.....	77
Figure 28 : Répartition des émissions des PM10 dans la RGC par source d'émissions	78
Figure 29 : Répartition des émissions des PM10 par catégorie de sources.....	79
Figure 30 : Cartographie des émissions des PM10 relatives aux GSP.....	79
Figure 31 : Cartographie des émissions des PM10 relatives aux GSL	80
Figure 32 : Cartographie des émissions des SVOL.....	81
Figure 33 : Simulation de la dispersion des concentrations moyennes journalières	82
Figure 34 : Simulation de la dispersion des concentrations moyennes annuelles.....	83
Figure 35 : Cartographie annuelle simulée pour les PM10 en 2010	84
Figure 36 : Réseau de mesure de la qualité d'air au niveau de la RGC.....	87
Figure 37 : Diagramme en boîtes de Tuckey : données statistiques des concentrations horaires en PM10 dans la RGC pendant 2014	89
Figure 38 : Evolution mensuelle des PM10 dans la RGC.....	90
Figure 39 : Le profil moyen hebdomadaire des PM10 dans la RGC en 2014	91
Figure 40 : Profil des centiles 90.4 des concentrations moyennes journalières en PM10 selon les treize stations.....	91

Figure 41: Diagramme QQ plot des concentrations horaires observées et prévues de PM10 pour 2014.....	92
--	----

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre le nombre minimum de stations selon l'ordonnance sur les mesures de polluants atmosphériques et le nombre de sites de mesures en Autriche.....	25
Tableau 2 : Composés analysés au laboratoire interne au niveau de l'Allemagne.....	26
Tableau 3 : Inventaire 2010 des émissions de la RGC (Emission en t/an)	50
Tableau 4 : Inventaire 2010 des émissions de la RGC (Emission en t/an)	51
Tableau 5 : Les types de modèles de dispersion	58
Tableau 6 : Les chemins et leurs définitions	70
Tableau 7 : Nombre et catégories de sources modélisées	76
Tableau 8 : la moyenne annuelle des PM10 en 2010 et 2014 dans la RGC.....	85
Tableau 9 : Moyenne annuelle et le taux de disponibilité des concentrations journalières en PM10 en 2014 sur la RGC	88

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
Résumé	4
Liste des abréviations	5
Liste des figures	7
Liste des tableaux	8
Introduction générale	12
Chapitre 1	15
Etude de Benchmarking sur les organismes chargés de la surveillance de la qualité d'air	15
1. Introduction :	16
2. Organisation du dispositif de surveillance :	16
2.1. Organismes en charge de la surveillance de la qualité de l'air :	16
2.2. Zonage du territoire de surveillance :	20
2.3. Le réseau de mesure : Choix, installation et pérennité de mesure :	23
3. Moyens techniques et outils de surveillance :	24
3.1. Stations fixes et mobiles :	24
3.2. Laboratoire de chimie interne :	26
3.3. Inventaire/Cadastre des émissions:	27
3.4. Modélisation cartographique:	29
4. Produits, leur communication:	29
4.1. Produits de la qualité d'air :	29
4.2. Communication et procédures d'alertes:	34
5. Conclusion:.....	36
Chapitre 2	37
Généralités sur la pollution particulaire et la description du milieu récepteur	37
1. Les Particules :	38
1.1. Définition :	38
1.2. Composition des particules :	38
2. La pollution particulaire au Maroc :	40
3. Description du milieu récepteur (zone d'étude):	41
3.1. Situation géographique :	41
3.2. Milieu naturel et humain :	42
3.3. Equipements et infrastructures :	44
3.4. Secteurs économiques :	46

3.5. Problèmes environnementaux :	47
3.6. Problèmes sanitaires :	48
4. Emissions atmosphériques dans la RGC :	49
4.1. Inventaire d'émissions atmosphériques de 2010 :	49
Chapitre 3	52
La Modélisation de la dispersion atmosphérique	52
1. Généralités sur la modélisation de la dispersion atmosphérique :	53
1.1. Introduction :	53
1.2. Phénomène influençant sur la dispersion atmosphérique :	53
1.3. Principe de base d'un modèle de dispersion :	57
1.4. La typologie des modèles de dispersion :	57
1.5. Les entrées / sorties standard d'un modèle :	58
2. Système de modélisation AERMOD :	59
2.2. Préprocesseurs du modèle AERMOD :	60
2.3. Le modèle AERMOD :	68
Chapitre 4	73
Cartographie des PM10 dans la RGC au cours de l'année 2014	73
1. Le domaine d'étude :	74
1.1. Topographie et occupation des sols :	74
1.2. La grille des récepteurs :	75
2. Sources modélisés dans AERMOD :	76
3. Condition météorologique :	77
4. Emissions de PM10 dans la RGC :	78
4.1. Emissions de PM10 par catégorie de sources :	78
5. Simulation de dispersion des émissions de toutes les catégories de sources sur la RGC au cours de l'année 2014 :	82
5.1. La cartographie des concentrations journalières simulées pour 2014:	82
5.2. La cartographie des concentrations annuelles simulées pour 2014 :	83
5.3. Résultats et observations :	84
6. Evolution de la pollution par les PM10 entre 2010 et 2014 sur la RGC :	84
Chapitre 5	86
Comparaison modèle/station	86
1. Etat de la pollution particulaire(PM10) durant l'année 2014 dans la RGC :	87
1.1. Description des stations de la qualité d'air dans la RGC :	87
1.2. Etat de la qualité d'air en PM10 dans la RGC au cours de l'année 2014 selon les 13 stations :	88

2. Comparaison modèle/station :	92
3. Recommandations :	93
Conclusion générale	94
Annexes	96
Références Bibliographiques	109
Webographie	111

Introduction générale

La pollution de l'air est un fléau qui tend à s'accroître dans la plupart des grandes agglomérations des pays industrialisés. Il est clair que ce sujet particulièrement sensible suscite l'inquiétude fondée de l'opinion publique. En effet, la prise en compte de la protection de la qualité de l'air dans les politiques sectorielles, l'énergie, les transports, l'aménagement du territoire, est aujourd'hui une nécessité. En 2000, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a recensé plus de 650.000 causes de décès liés à la pollution de l'air dans les pays émergents. Au Maroc, le coût de la dégradation de la qualité de l'air a été évalué par la banque mondiale, à près de 3,6 milliards de Dirhams par an.

La population marocaine à l'instar des populations des pays en voie de développement, a connu un fabuleux développement urbain et industriel durant ces dernières décennies. Ce développement a permis certes de développer le tissu productif, de générer d'importantes opportunités d'emplois pour des centaines de milliers de familles, mais au détriment de la mobilité et de la qualité de l'environnement, particulièrement au niveau de l'air.

Par ailleurs, des efforts sont déployés par la DMN pour la mise en place et l'élargissement d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air. Ce dernier permet le suivi et la mesure des principales substances rejetées dans l'atmosphère, qui sont responsables de la pollution de fond à laquelle la population est exposée en permanence. Ces polluants sont principalement les particules fines en suspension (PM10), les gaz des oxydes d'azotes (NOx), du dioxyde de soufre (SO₂), des oxydes de carbone (CO) et de l'ozone (O₃) qui résulte de processus photochimiques plus ou moins complexes.

C'est dans ce contexte qu'une comparaison de l'organisation et des pratiques en matière de surveillance de la qualité de l'air entre différents pays et le Maroc a été réalisée. Sous un benchmarking (un processus continu de recherche, d'analyse comparative, d'adaptation et d'implantation des meilleures pratiques pour améliorer la performance des processus dans une organisation) entre un certain nombre de pays pilotes dans la surveillance de la qualité de l'air, afin de mieux connaître les pratiques en matière de surveillance de la qualité de l'air à l'étranger et identifier les bonnes pratiques qui pourraient être mises en œuvre dans un but d'amélioration du dispositif marocain. Ainsi fut déterminé le premier objectif de la présente étude.

Il concerne une étude de benchmarking permettant d'évaluer l'expérience marocaine par rapport aux expériences internationales en matière de la surveillance de la qualité d'air, afin de s'inspirer des produits mis en place par les autres organismes et de proposer des nouveaux produits pour la DMN.

Par ailleurs, la modélisation cartographique de la dispersion atmosphérique est un moyen d'analyse intéressant qui existe au niveau de la DMN. Il combine l'outil modélisation et les résultats des cadastres des émissions atmosphériques. Cela permet de cartographier les concentrations et déterminer la part de contribution d'une source particulière ou plusieurs sources à la pollution. De plus elle constitue la première étape d'évaluation de risques sanitaires, d'études épidémiologiques et des conséquences d'exposition. En fait, elle permet de définir la zone d'exposition préalable à la détermination des niveaux d'exposition de la population. Elle permet également de cibler une zone pour laquelle on devra prendre des mesures sanitaires ou environnementales adéquates en fonction des niveaux de contamination calculés.

La surveillance de la qualité de l'air au niveau de la Région du Grand Casablanca (RGC) suscite l'intérêt de plusieurs partenaires dont la DMN, la Fondation Mohammed VI et la Wilaya du grand Casablanca, afin de mettre à la disposition des collectivités et des décideurs les outils et les informations nécessaires à la compréhension et à la gestion des problèmes de pollution de l'air. Parmi les polluants qui font objet de surveillance dans les stations de mesure, les particules, qui sont des polluants nocifs responsables des effets néfastes sur la santé humaine. Les particules les plus nuisibles pour la santé sont celles dont le diamètre n'excède pas 10 microns (PM10); elles peuvent pénétrer et se loger en profondeur dans les poumons. L'exposition chronique à ces particules est un facteur à risque de maladies cardiovasculaires et respiratoires, et de cancer du poumon.

Dans cette perspective, une application de l'outil de modélisation cartographique de la dispersion atmosphérique des PM10 au niveau de la RGC est jugée utile, de sorte d'évaluer et quantifier leurs concentrations dans l'air ambiant en vue de déterminer les zones les plus touchées par la pollution particulaire. Cette partie sera développée dans la deuxième moitié de cet ouvrage. Elle s'inscrit dans le cadre de l'application de l'un des outils majeurs au niveau de la DMN, permettant de simuler la dispersion des PM10 par la modélisation numérique à l'aide du modèle AERMOD et les résultats de l'inventaire d'émission atmosphérique au niveau de la RGC pendant l'année 2014. Elle consiste en cinq chapitres.

Ce rapport synthétise donc les travaux effectués et présente les résultats finaux. Il s'articule autour de cinq chapitres et une conclusion.

Le premier chapitre sera consacré à une étude de benchmarking permettant d'évaluer l'expérience marocaine par rapport aux expériences internationales en matière de la surveillance de la qualité de l'air, afin de s'inspirer des produits mis en place par les autres organismes et de proposer des nouveaux produits pour la DMN.

Le deuxième chapitre sera porté sur des généralités sur la pollution particulaire (PM10) ainsi qu'à la présentation du milieu récepteur à savoir la RGC, et l'inventaire des émissions atmosphériques qui comprend des d'informations qualitatives et quantitatives sur les sources d'émissions et leur contribution respective dans la région. Le troisième chapitre s'intéressera aux généralités sur la modélisation de la dispersion atmosphérique et à la présentation du système de modélisation AERMOD et de son principe général de fonctionnement.

Le quatrième chapitre relate les résultats des simulations effectuées, dans lequel la contribution de principales sources émettrices des particules sera quantifiée et comparée à la norme en vigueur. Enfin le dernier chapitre est consacré à l'analyse des résultats de comparaison modèle/station.

En dernier lieu, une conclusion et des perspectives seront présentées à la fin de l'ouvrage.

Chapitre 1

Etude de Benchmarking sur les organismes chargés de la surveillance de la qualité d'air

Ce chapitre évaluera l'expérience marocaine en matière de la surveillance de la qualité de l'air, de point de vue gouvernance, moyens utilisés, produits et leur communication par rapport aux organismes internationaux afin de s'inspirer de la stratégie mise en place par les autres organismes et de proposer des améliorations pour l'organisme marocain.

1. Introduction :

Le Benchmarking est une technique qui consiste à étudier et analyser les techniques de gestion, les modes d'organisation des « leaders », afin de s'en inspirer de leurs idées, de leurs pratiques, de leurs fonctionnements et de leurs expériences et d'en tirer le meilleur.

C'est un processus continu de recherche, d'analyse comparative, d'adaptation et d'implantation des meilleures pratiques pour améliorer la performance des processus dans une organisation. De plus un organisme qui réalise un Benchmark prévient son concurrent qui pourra s'il le souhaite l'aider en lui donnant des informations.

Le présent chapitre exposera l'étude de benchmarking entre la DMN et les autres organismes chargés de la surveillance de la qualité de l'air au niveau de l'Allemagne, l'Autriche, la Norvège, la Suisse, les Etats Unis, la France et la Tunisie.

2. Organisation du dispositif de surveillance :

2.1.Organismes en charge de la surveillance de la qualité de l'air :

▪ Allemagne :

Deux niveaux de gouvernance (le Bund fédéral et les Länder) en matière de la surveillance de la qualité de l'air en Allemagne (fig.1) fonctionnent en bonne entente [4].

- Au niveau fédéral représenté par le BMW (ministère fédéral du transport, du logement et du développement Urbain) s'occupe des transpositions des directives européennes en loi sur les émissions.
- Au niveau du Land : par des établissements publics ou services techniques de l'administration du ministère en charge de l'environnement.

Ces deux niveaux fonctionnent via le concours technique et logistique de l'Agence fédérale de l'environnement (UBA) qui assure la coordination fédérale de l'information et du reporting en se chargeant de la saisie des données transmises par les Länder.

Ainsi une « commission du Bund et des Länder » (LAI) participe comme étant une structure de concertation et de proposition de normalisations techniques. Sans oublier la partie normalisation qui est gérée par le cercle allemand des Ingénieurs (VDI) qui assure une forte production de normes.

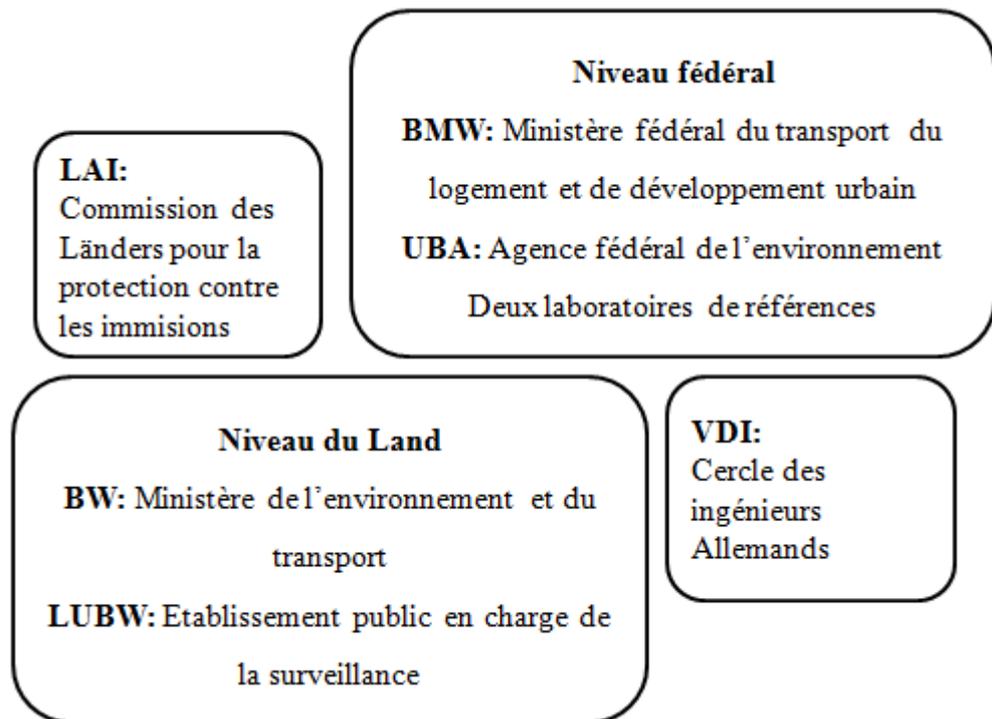


Figure 1 : Organisation de la surveillance de la qualité de l'air en Allemagne

▪ **Autriche :**

Il existe deux niveaux de surveillance de la qualité de l'air en Autriche [6] :

- ***Un réseau de mesure national :***

L'Agence de l'environnement, sous la tutelle du Ministère chargé de l'agriculture, et des forêts, gère le réseau de mesure national de la pollution de fond (8 stations de mesures). Il est conçu comme un système d'observation des niveaux de fond en polluants atmosphériques et non comme un système de surveillance et d'alarme.

- ***Une surveillance dans chaque Etat fédéral « Land » :***

Chaque Etat est chargé sur son territoire de mesurer les concentrations en polluants atmosphériques et d'informer la population sur la qualité de l'air qu'elle respire. Les 9 Etats de la république fédérale d'Autriche gèrent donc chacun un réseau de mesures.

▪ **Norvège :**

Le dispositif de surveillance Norvégien est morcelé tant dans le dispositif en lui-même (stations) que dans les acteurs qui le gouverne et le gère. Les acteurs identifiés sont [19] :

- Le NILU (au niveau national) : laboratoire central (étalonnage), modélisation, recherche, surveillance de fond (10 sites), base de données centrales (par sous-traitance du KLIF),
- les autorités locales : 39 sites, prévisions, alertes, responsable en cas de dépassements,
- les industriels : 10 sites proximité industrielle,

- les services de l'état : direction climat et pollution (KLIF : services de l'état en charge de la problématique air, énergie et climat) : MOA de la base de données centrale, reporting européen,
- le marché privé des bureaux d'études (nationaux ou étrangers) qui gèrent la maintenance des réseaux des autorités locales.

▪ Suisse :

Conformément à l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair), il existe deux niveaux de surveillance de la qualité de l'air en Suisse [5] :

- ✓ **Une surveillance nationale** par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) qui procède à des relevés sur la pollution atmosphérique sur l'ensemble du pays.
- ✓ **Une surveillance cantonale** par les cantons, chaque canton se dispose d'un « Réseau d'observation de la pollution atmosphérique » géré en général par un service cantonal de protection de l'air ou de mesure des émissions.

▪ Etats Unis :

Au niveau des états Unis on assiste à trois niveaux de surveillance de la qualité d'air [2] :

- **Fédéral** : par US EPA qui a le pouvoir de légiférer pour réglementer les niveaux de pollution atmosphérique.
- **Régional** : L'US EPA possède 10 bureaux régionaux répartis à travers le pays.
- **State** : par les agences des Etats, en charge de mesurer et surveiller la qualité de l'air.



Figure 2 : Organisation des pouvoirs en matière de qualité de l'air en USA [2]

▪ **France :**

Le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) est responsable de la mise en œuvre de la politique nationale de surveillance, de prévention et d'information sur l'air. Il s'appuie pour cela [31] :

- à l'échelle locale sur 26 Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) chargées de la mise en œuvre de la surveillance et de l'information du public sur la qualité de l'air ambiant régional,
- à l'échelle nationale sur le LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air).

La composition multipartite de ces structures est une garantie de transparence et de crédibilité des informations diffusées.

▪ **Tunisie :**

Sous la tutelle du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, l'agence nationale de protection de l'environnement (ANPE) est le premier responsable de la surveillance de la qualité de l'air à travers un réseau national [14].

A cet édifice s'ajoute la création du CITET (Centre International des Technologies de l'Environnement de Tunisie) en vue de compléter et consolider, sur le plan institutionnel, la structure déjà établie. Il se charge de l'échantillonnage et analyse des polluants atmosphériques émis ainsi qu'à l'évaluation de la qualité de l'air à l'intérieur des locaux de travail y compris les mesures de la pollution sonore par des systèmes de mesure du bruit en continu et instantané.

▪ **Comparaison avec le Maroc :**

Sous la tutelle du Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, la Direction de Météorologie Nationale (DMN) de Casablanca est le gestionnaire de toutes les stations constituant le réseau national. La Fondation Mohammed VI pour la protection de l'environnement, vient pour coordonner l'activité de la surveillance de la qualité de l'air avec l'ensemble des acteurs.

Cette structure unique de surveillance (la DMN) vers laquelle se tourne le Maroc de ne recourir, qu'à un seul organisme pour assurer la surveillance de la qualité de l'air peut être un point positif de point de vue homogénéisation des pratiques.

Dans les pays fédérés ou assimilés, la surveillance de la qualité d'air est assurée en deux niveaux voire même trois : un réseau national et des réseaux régionaux et/ou locaux.

Une telle disposition existe à la DMN à travers ces directions régionales ainsi que des comités régionaux dont leur contribution au niveau de la qualité d'air est relativement absentes sauf le cas de Mohammedia.

2.2.Zonage du territoire de surveillance :

▪ Allemagne :

Le zonage du territoire est fait avec des critères non harmonisés entre les Länder. Les éventuels ajustements sur le zonage sont discutés et validés au sein de la commission LAI [2].

▪ Autriche :

Le zonage est différencié selon les polluants(fig.3). Ainsi pour l'ozone, il y a 8 zones de surveillance découpées selon des critères topographiques et climatiques. Pour SO₂, CO, NO₂, PM₁₀, Cd, As, Ni et BaP, il y a 9 zones (1 par Etat) plus 3 zones agglomérées (Vienne, Graz, Linz) [6].

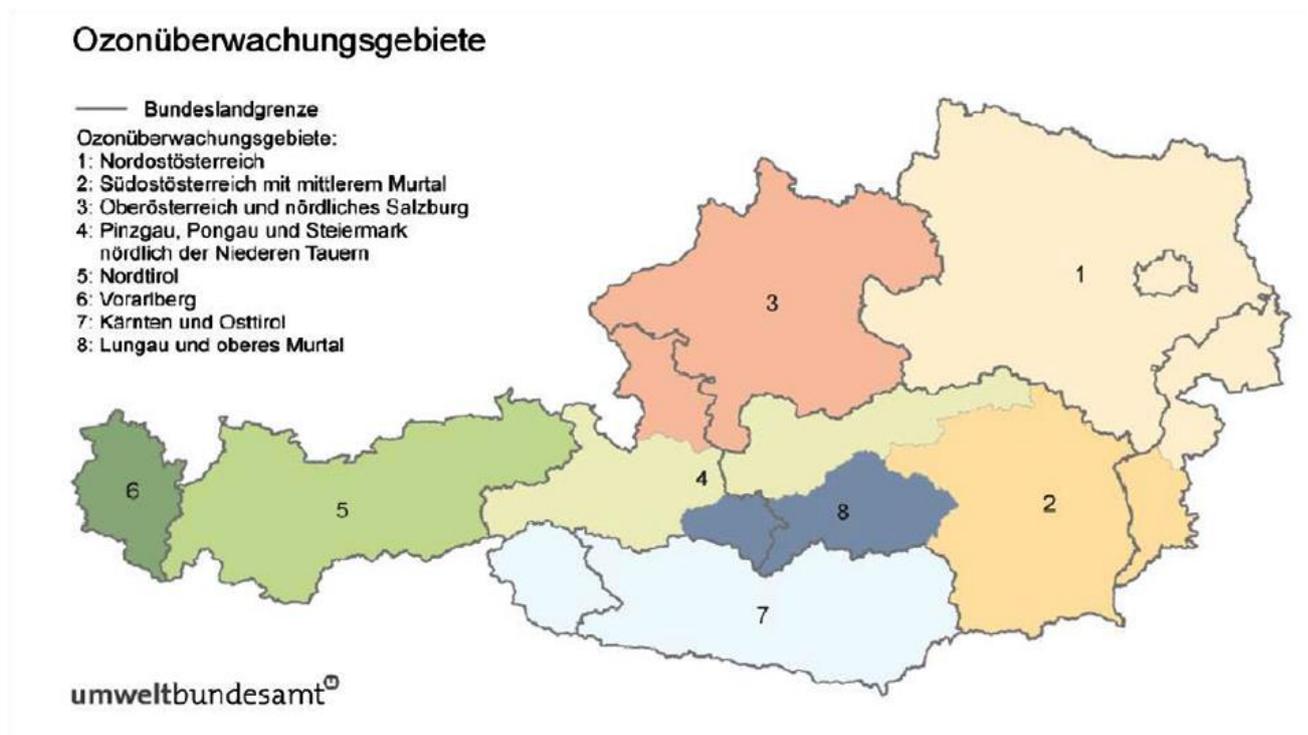


Figure 3 : Zones de surveillance de l'ozone en Autriche – source : Umweltbundesamt

▪ Suisse :

Le niveau géographique de surveillance est le canton, c'est pour cette raison que Le zonage du territoire est constitué par les 26 cantons (fig.4) qui structurent la Suisse [5].

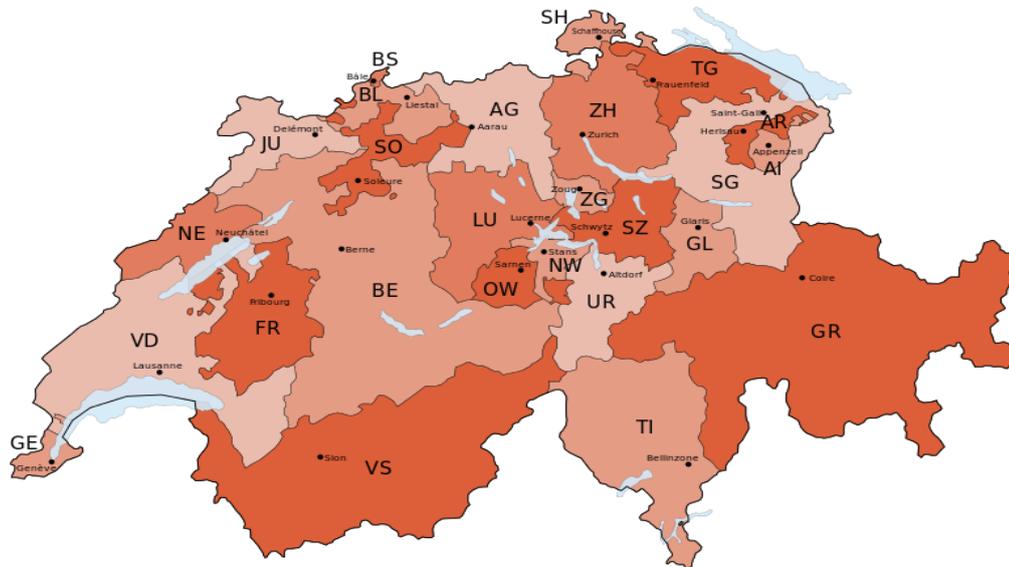


Figure 4 : Zonage de la surveillance de la qualité de l'air en Suisse [5]

▪ Tunisie :

Il n'existe pas une stratégie claire en matière de zonage du territoire pour la surveillance de la qualité de l'air au niveau de la Tunisie. La répartition spatiale des stations de l'ANPE (fig.5) montrent une forte concentration dans la capitale et les grandes villes tunisiennes.

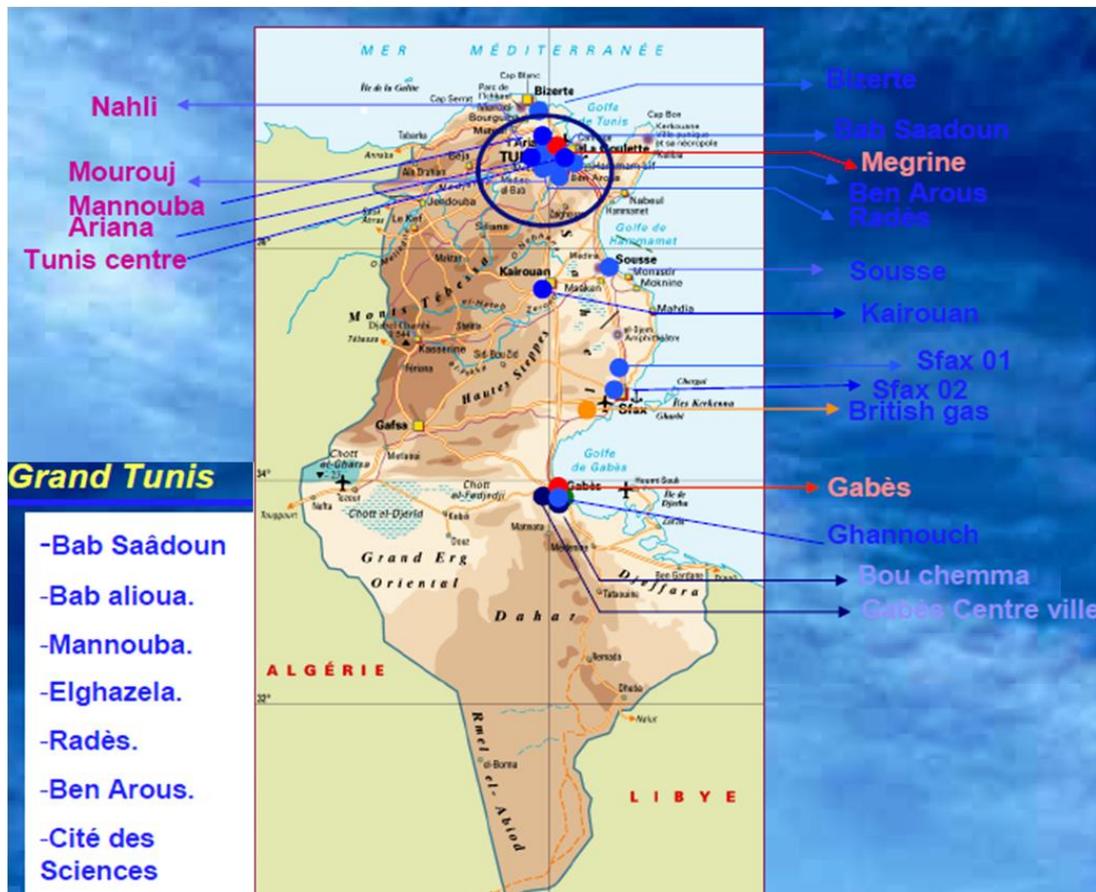


Figure 5 : Zones de surveillance de la qualité d'air en Tunisie [15]

▪ France :

Dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air, l'analyse du zonage du territoire a permis de découper le territoire français[1] en se basant sur la notion de 4 zones (fig.6) :

- la Zone AGglomération (ZAG): regroupant les unités urbaines > 250 000 habitants,
- la Zone URbaine régionale (ZUR): regroupant les unités urbaines comprises entre 50 000 et 250 000 habitants,
- la Zone Régionale (ZR): zone de niveau régional comprenant les unités urbaines < 50000 habitants,
- la Zone Industrielle (ZI): zone d'activités industrielles spécifiques (se limitant en France au Havre- Port Jérôme et à Fos Berre).

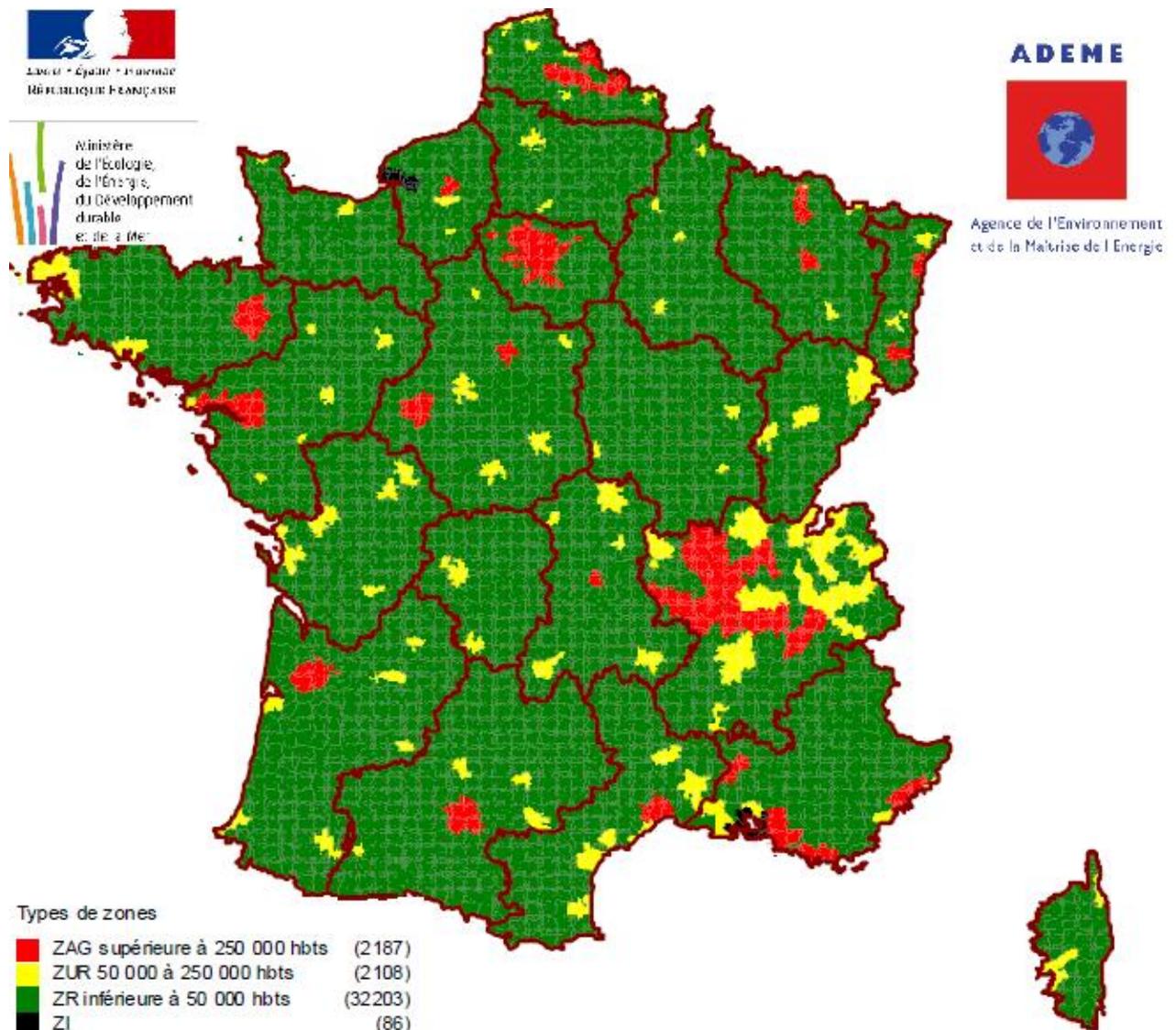


Figure 6 : Zonage du territoire français dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air [1]

▪ **Comparaison avec le Maroc :**

Le zonage étranger est calé soit sur des zones administratives soit sur des zones «homogènes» de pollution soit un mélange des deux.

Le Maroc et la Tunisie semblent très éloignés de ce critère, ils ne disposent pas d'une stratégie claire en matière du zonage du territoire pour la surveillance de la qualité de l'air, vue que la répartition spatiale des stations ne montrent une forte concentration que dans les grandes villes et leurs réseaux ne couvrent pas l'ensemble du pays surtout les zones où se trouve une forte activité minière.

La logique de zone homogène de pollution a même été poussée jusqu'à la définition de zones de surveillance différenciées selon les polluants en Autriche. Le zonage du territoire de surveillance semble plus cohérent avec le zonage administratif vue la possibilité de mise en œuvre de plans d'actions.

Prévoir un zonage qui prend en compte les caractéristiques de l'impact de la pollution atmosphérique (dispersion, émissions) serait un plus.

2.3.Le réseau de mesure : Choix, installation et pérennité de mesure :

▪ **Allemagne :**

L'organisme en charge de la surveillance au niveau du Land fait le choix des implantations de nouveaux sites. Ce choix est validé par le Ministère du Land. Il n'y a pas de difficulté majeure à installer des nouvelles stations : un terrain est mis à disposition par les communes et les frais d'installation sont pris en charge par l'organisme en charge [4].

▪ **Autriche :**

Les choix sont opérés de manière souveraine par chaque canton si possible dans des lieux appartenant à l'Etat selon leur sensibilité et les moyens dont ils disposent. Si l'emplacement choisi est privé, un contrat de bail est mis en place avec l'agence de l'environnement. Le délai d'installation de ces sites a toujours été de quelques mois [6].

▪ **France :**

Les stations de mesure sont installées par les AASQA selon le « bon vouloir » des autorités locales qui les hébergent. Les AASQA ne disposent d'aucun pouvoir ni force de contrainte pour s'installer là où elles le souhaiteraient. Cela conduit de ce fait à des longues démarches, qui font que le délai moyen d'installation d'une station en France atteint fréquemment plusieurs années [1].

▪ **Comparaison avec le Maroc :**

Dans les pays de ce comparatif, il apparaît que la pérennité des stations pose moins de problème et que les délais d'installation soient très raccourcis par rapport au Maroc: ils ne sont en moyenne que de quelques mois.

La DMN n'a toutefois pas le droit de s'installer là où elle veut. Les critères d'implantation sont associés à des contraintes administratives et des démarches longues, risquent de poser des difficultés de pérennité de nombreuses stations.

Les réseaux de surveillance dans les pays du comparatif sont pour la plupart gérés par des structures administratives régionales ou locales (municipalités, agence régionale de l'environnement). Elles ont toutes les facilités administratives pour s'installer sur leur territoire et elles obtiennent les autorisations nécessaires dans des délais raisonnables.

3. Moyens techniques et outils de surveillance :

3.1.Stations fixes et mobiles :

▪ **Allemagne :**

Il n'existe pas des statistiques sur le nombre exact des stations automatiques fixes au niveau de l'Allemagne. Toutefois au niveau du Land de Bade- Wurtemberg comme étant un grand centre d'industrie automobile en Allemagne, son réseau de mesure est composé de 41 stations de mesure dont 33 Urbaines, 4 trafics, et 4 rurales. Il est complété par plus de 25 stations de mesures dites « spot » et 38 sites de mesure des dépôts atmosphériques secs. Pour les moyens mobiles des campagnes de mesures sont menées avec des mini-cabines et NUPS (système léger de prélèvement actif sur batterie) [4].

▪ **Autriche :**

Le réseau national est constitué de 8 stations de mesure. 197 autres stations sont réparties sur l'ensemble du territoire, elles sont gérées par les réseaux de mesure des 9 Etats (Bundesländer). Le nombre de sites fixes est largement au dessus du nombre minimum de sites selon la directive européenne (tab.1).

Au niveau des états fédéraux les stations mobiles sont utilisées par le service de surveillance de l'air pour réaliser des études spécifiques sur la qualité de l'air : recherche et validation de nouveaux sites, et traitement de plaintes [6].

Tableau 1 : Comparaison entre le nombre minimum de stations selon l'ordonnance sur les mesures de polluants atmosphériques et le nombre de sites de mesures en Autriche – source Umweltbundesamt

	Nombre minimum selon l'ordonnance sur les mesures de polluants atmosphériques	Nombre de stations de mesure en Autriche en 2008
SO ₂	63	111
NO ₂	79	156
CO	27	42
PM ₁₀	77	135
PM _{2.5}	12	12
Cd	11	21
As	11	20
Ni	11	20
Benzène	12	24
B(a)P dans les PM ₁₀	15	20
Dépôts de poussières	Non précisé	162
Ozone	93	117

▪ **France :**

En France, 739 sites de mesures permanents dont 125 industriels, 84 trafic, 13 d'observation spécifique et 377 de fond dont 10 dédiés à la mesure de la pollution longue distance (EMEP) [30].

Pour les moyens mobiles seulement l'Île-de-France dispose de 11 moyens mobiles (2 véhicules, 3 remorques, 3 armoires, 1 petit bungalow, 1 tricycle et 1 voiture) pour des mesures embarquées, Validation de nouveaux sites, étude de comportement de sites existants, campagnes de mesure d'intérêt général ou de prestations d'études spécifiques [1].

▪ **Tunisie :**

La Tunisie contient 20 stations fixes raccordées au Poste Central National à l'ANPE dont 9 sont installées dans le Grand Tunis. Elles sont réparties d'une façon non uniforme sur l'ensemble du territoire Tunisien.

Pour les moyens mobiles le R.N.S.Q.A comprend actuellement un laboratoire mobile air ambiant, et un laboratoire mobile à l'émission. On note aussi l'utilisation de matériel portable pour l'échantillonnage de l'air comme le dispositif de barbotage, et Testo 350 [15].

▪ Comparaison avec le Maroc :

Le réseau automatique pour la surveillance de la qualité de l'air au Maroc compte aujourd'hui 29 stations automatiques fixes dont 13 stations se situent au niveau du grand pôle de Casablanca. En plus de deux moyens mobiles qui assurent des campagnes de mesures ponctuelles au profit de tout le royaume, afin de Caractériser la pollution de l'air et de définir les sites potentiels pour l'implantation de futures stations fixes.

Il semble que les pays de ce comparatif considèrent le nombre de sites mentionnés dans les directives comme un objectif minimum et non comme un optimum. Il n'existe pas de stratégie définissant le nombre de sites de mesure : ils sont déterminés selon les moyens et la priorité accordée à la surveillance de la qualité de l'air. Alors que les moyens mobiles sont utilisés que pour la validation des sites ou la réalisation des études spécifiques, ils sont moins utilisés pour de la communication et des actions de sensibilisation, comme le cas en France, où ils sont souvent présentés à des visiteurs, lors de salons, expositions ou autres évènements publics.

3.2.Laboratoire de chimie interne :

▪ Allemagne :

Chaque Land dispose d'un laboratoire de chimie qui analyse les tubes passifs et actifs, les métaux lourds et HAP ainsi que des analyses gravimétriques de PM10 et PM2.5. Les méthodes de référence sont données au sein de la LAI et du VDI en s'appuyant sur l'un des deux laboratoires de référence.

Les composés analysés sont présentés dans le tableau ci-après (tab.2) :

Tableau 2 : Composés analysés au laboratoire interne au niveau de l'Allemagne [4]

Composés	Préleveurs	Méthodes d'analyse
PM10	Digitel DHA80 / Leckel SEQ	Gravimétrie
PM2.5	Digitel DHA80 / Leckel SEQ	Gravimétrie
Pb, Cd, Ni, As	Digitel DHA80 / Leckel SEQ / Quarzfaserfilter	ICP-MS après minéralisation
BaP	Digitel DHA80 / Leckel SEQ / Quarzfaserfilter	HPLC-FLD sous reflux
EC/OC	Digitel DHA80 / Leckel SEQ / Quarzfaserfilter	Thermographie
Benzène, Toluène, Xylène	ORSA Tubes passifs	G C - F I D

- **Norvège :**

Le laboratoire du NILU réalise 100 000 analyses par an (BTX, dioxines gravimétrie, NO₂, métaux, etc). Pour les analyses autres que celles nécessaires au NILU, chaque Autorité Locale dispose de son propre laboratoire ou elle utilise un sous-traitant [19].

- **Comparaison avec le Maroc :**

En complément des mesures réalisées par le réseau automatique, des prélèvements par filtres, capteurs passifs ou actifs sont également effectués. L'existence du laboratoire interne offre ainsi une plus grande souplesse dans la mise à disposition des résultats, mais également une expertise plus approfondie dans la mesure des différents polluants. De plus, il permet d'optimiser les coûts d'analyse surtout lors de campagnes de grande ampleur.

La majorité des pays de ce comparatif dispose d'un laboratoire de chimie interne pour la surveillance de la qualité d'air, EPA en Etats Unis dispose des laboratoires répartis sur tout le territoire américain, ainsi qu'en Tunisie le Laboratoire du CITET dispose des équipements nécessaires pour prélever et analyser la composition de l'air aussi bien ambiant qu'à l'émission.

Cette gestion interne est un atout majeur pour maîtriser au mieux les prélèvements sur terrain et exploiter les résultats qui en découlent.

3.3. Inventaire/Cadastre des émissions:

- **Allemagne :**

Au niveau fédéral l'UBA gère un inventaire national à la résolution de 7 km. Cet inventaire est essentiellement destiné à produire des scénarios sur le long terme (2020). Toutefois des inventaires des émissions sont réalisés à l'échelle communale, actualisé tous les 3 ans pour le secteur industriel [4].

- **Autriche :**

Il existe au niveau national un inventaire des émissions (mais cet inventaire n'est pas spatialisé). Le service de surveillance de l'air gère et met à jour un cadastre des émissions de NO_x, de NO₂, de SO₂, de CO, des PM₁₀, des COVNM, du CH₄ et du CO₂ sur l'ensemble de son territoire (Etat de Styrie) avec un maillage de 500 mètres [6].

▪ **Etats Unis :**

Les inventaires d'émissions sont gérés au niveau local par les agences d'Etat. Des travaux sont menés ont permis d'obtenir des inventaires d'émissions de façon plus automatique, et qui sont mis à jour de façon plus régulière. Ces travaux comprennent une part de standardisation, pour identifier et corriger de façon automatique les incohérences pour chaque type de source d'émission [2].

▪ **France :**

Un inventaire national spatialisé (INS) est exploité au niveau national depuis 2011. En parallèle, la plupart des AASQA disposent d'un cadastre des émissions au niveau régional.

L'Inventaire National Spatialisé (INS) concerne les émissions d'une quarantaine de polluants émis par toutes les sources recensées (activités anthropiques ou émissions naturelles), suivant une maille kilométrique [1].

▪ **Comparaison avec le Maroc :**

Le Maroc ne dispose pas d'un cadastre national mais 18 villes vont fait l'objet des inventaires des émissions atmosphériques et d'une analyse prospective de leur l'évolution pour plusieurs polluants.

Les pratiques sont visiblement très variées au niveau des pays fédérés, notamment en ce qui concerne la réalisation d'inventaires locaux. Des moyens importants et réguliers sont donnés par le niveau national à la réalisation d'un inventaire national.

Les cadastres ou les inventaires des émissions demeurent des outils indispensables. Ils aident à la surveillance de la qualité d'air mieux encore ils permettent de connaître et de maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, de les identifier et les quantifier. Cette connaissance permet ensuite de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. Les inventaires d'émissions sont également une donnée de base nécessaire pour réaliser des évaluations de qualité de l'air et estimer les impacts de cette pollution sur la santé et les écosystèmes.

3.4. Modélisation cartographique:

- **Autriche :**

Sur la base d'un module météorologique (modèle GRAMM) et d'un module de dispersion (modèle Lagrangien GRAL) ainsi que les mesurées des stations et les données de prévision. Des estimations de concentration sont générées en tout point du territoire surveillé [6].

- **Suisse :**

Sur le site internet de l'OFEV, une modélisation cartographique est établie sur la base des valeurs mesurées les dernières 24 heures issus d'environ une centaine de stations sur l'ensemble du territoire Suisse [5].

- **Comparaison avec le Maroc :**

La plupart des pays de ce comparatif utilisent la modélisation cartographique basée sur les prévisions ou les mesures des stations automatiques. La DMN développe un outil depuis 2010 combinant les résultats des inventaires des émissions et l'outil modélisation afin d'assurer une modélisation cartographique permettant d'évaluer l'impact à travers une simulation de la dispersion du panache polluant émis par un certain nombre de sources. Tout en générant des cartes qui estiment des concentrations en tout point du territoire.

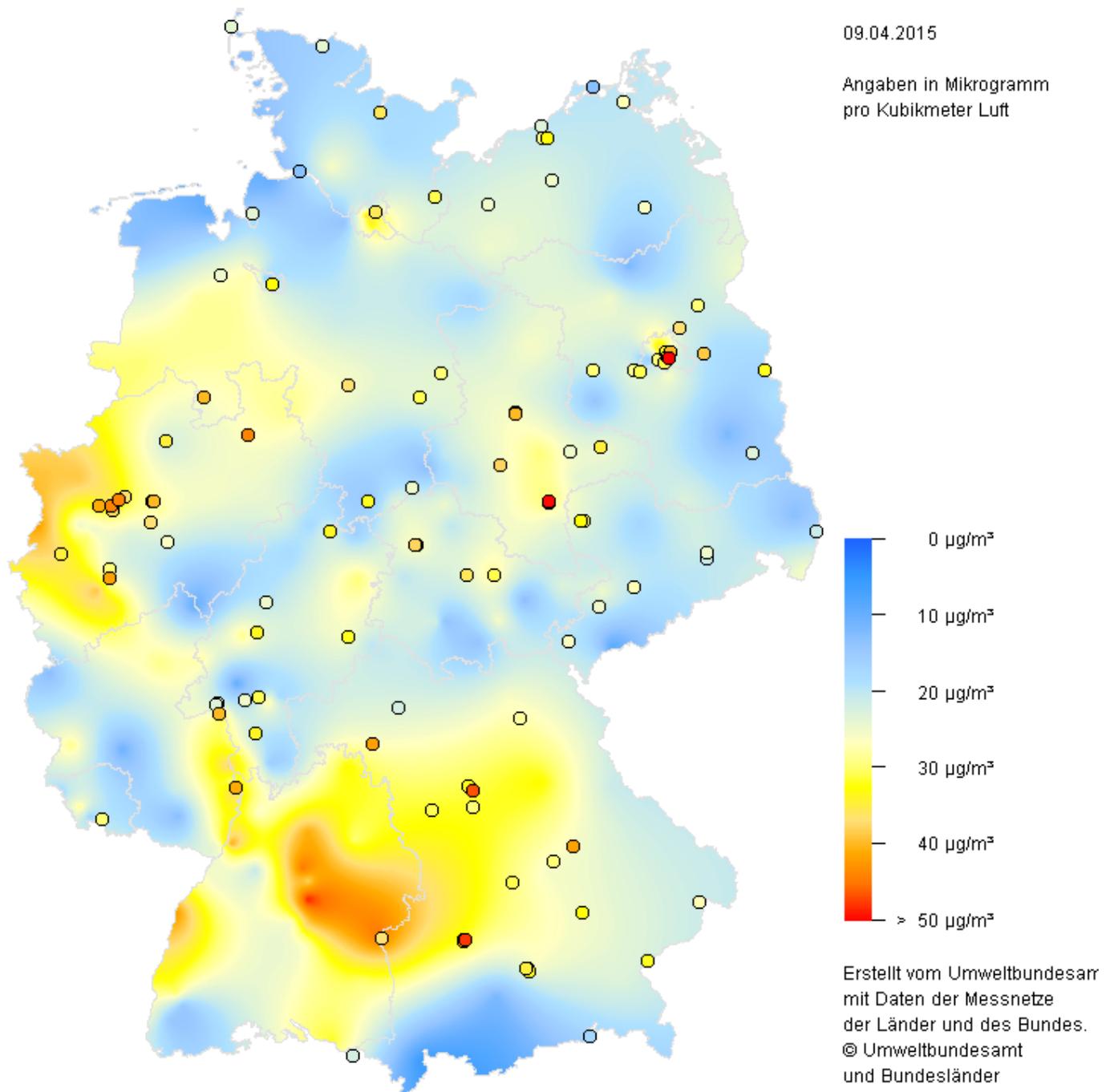
4. Produits, leur communication:

4.1. Produits de la qualité d'air :

- **Allemagne :**

L'UBA fédérale produit des bilans [mensuels](#) et [annuels](#). Les données nationales sont accessibles par station de mesure et par zone sur internet (fig.7). Les valeurs récapitulatives annuelles et historiques sont disponibles sur le site internet de transfrontalier Atmo-rhenA (<http://www.atmo-rhena.net>) et sur le site fédéral de l'agence de l'environnement (www.uba.de) [4].

Tagesmittelwerte der Partikelkonzentration



Die vom Umweltbundesamt zusammengestellten Karten und Daten zur aktuellen Immissionssituation dienen der orientierenden Information der Bevölkerung. Auf Grund der weiträumigen Betrachtung ist eine kleinräumige Interpretation nicht zulässig.

Figure 7 : L'affichage des données par stations et par polluants (source : <http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/aktuelle--luftdaten>)

▪ Autriche :

Au niveau national comme cantonal des bilans de la qualité de l'air sont établis quotidiennement, mensuellement et annuellement par l'agence de l'environnement.

Ils sont accessibles et téléchargeables librement sur le site internet de l'agence de l'environnement. ([Bilan journalier](#), [Bilan mensuel](#), [Bilan annuel](#)). En période de nombreux dépassements de valeurs réglementaires, des bilans ponctuels de la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire sont également établis par l'agence de l'environnement [25].

▪ Suisse :

Au niveau fédéral comme cantonal des bilans de la qualité de l'air sont établis annuellement et mensuellement. Ils sont accessibles et téléchargeables librement sur le site Internet de l'OFEV ([Bilan annuel](#), [Bilan mensuel](#)). Leur sortie est annoncée aux médias ainsi qu'aux milieux concernés (professionnel, politique). Ainsi Toutes les publications ([Publications Air](#)) et les statistiques ([Statistiques NABEL](#)) sur l'air peuvent être téléchargées ou commandées sur le site Internet de l'OFEV [5].

▪ Etats Unis :

Une interface de séries chronologiques (fig.8) sur le site internet de [l'US EPA](#) par endroit et par période spécifique permet de générer des bilans de la qualité de l'air sous forme de statistiques sommaires, de tableaux, et de cartes, pour les polluants objets de surveillance.

AirData
Access to monitored air quality data from EPA's Air Quality System (AQS) Data Mart

Basic Information
AirData gives you access to air quality data collected at outdoor monitors across the United States.
[Read more](#)

Visualize Data

- AQI Plot**
Compare AQI values for a location & time.
- Tile Plot**
Plot daily AQI values for a location & time.
- Concentration Plot**
Generate a time series plot for a location.
- Concentration Map**
Generate concentration maps for a specific time.
- More Tools**
See other visualization tools.

Download Data
Download daily or raw data to a spreadsheet or file.

Reports

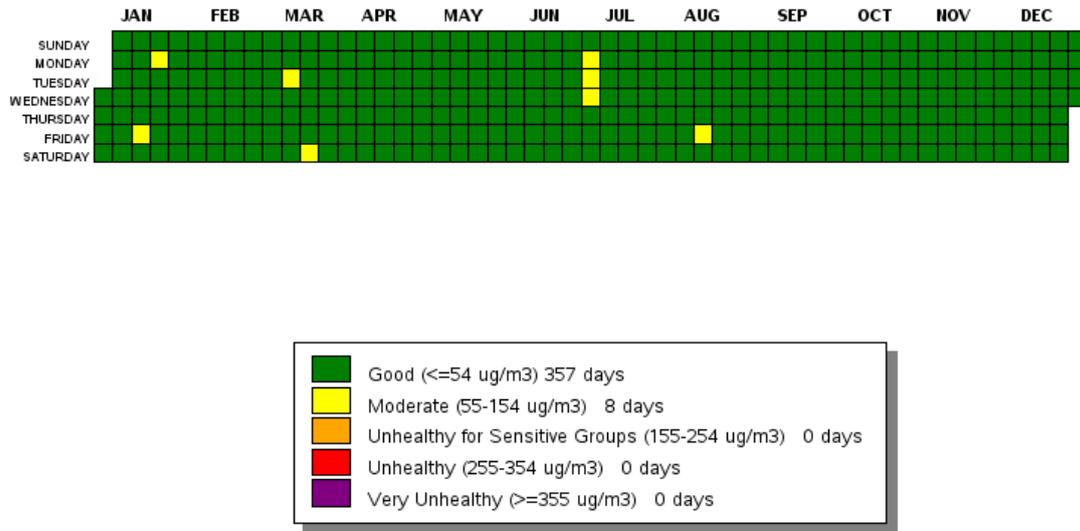
- Air Quality Index**
Display an annual summary of AQI values.
- Air Quality Statistics**
Display standards-related summary data by city or county.
- Monitor Values**
Display criteria pollutant summary data.
- Monitor Values – HAPs**
Display Hazardous Air Pollutant (HAP) summary data.

Interactive Map
See where air quality monitors are located, get information about the monitors, and download monitor data. Select which monitoring networks to display.

Figure 8 : Données de la qualité d'air au niveau du site de l'EPA (Source : <http://www.epa.gov/airquality/airdata/>)

Un autre outil permet de tracer les valeurs quotidiennes de l'indice de la qualité de l'air (IQA) pour un endroit et une période spécifique (fig.9). Chaque carré représente un jour de l'année et un code couleur en fonction du niveau IQA pour cette journée. La légende compte le nombre de jours dans chaque catégorie IQA.

PM10 Daily AQI Values in 2014
Jefferson County, AL



Source: U.S. EPA AirData <<http://www.epa.gov/airdata>>
Generated: June 6, 2015

Figure 9 : Valeurs annuelles des PM10 avec AQI au niveau de Jefferson (Source : http://www.epa.gov/airquality/airdata/ad_viz_tile.html)

Interactive Map est une interface sous Google Earth qui permet d'afficher les différents sites de mesures, des informations concernant ces stations ainsi que les données journalières et annuelles sous forme Excel.

L'EPA propose de plus un outil AQI calculator (Air Quality Index) qui permet de traduire l'indice de qualité de l'air en concentration, et qui donne aussi les effets sanitaires provoqués par une telle concentration.

▪ France :

En matière de produits, un [Bilan annuel](#) de la qualité de l'air en France est publié chaque année par le ministère de l'Environnement [30]. Ainsi chacune des AASQA établit ses bulletins [mensuels](#), [trimestriels](#) et [annuels](#).

Les données journalières de la surveillance sont disponibles directement sur les sites (fig.10) des différents associations en charge de la surveillance de la qualité d'air, elles sont regroupées au sein de la fédération [Atmo-France](#).



Les stations sont colorées en fonction de leurs résultats, selon la grille de l'indice européen. Si l'indice global ou le sous-indice demandé n'est pas calculé, la station apparaît en gris. Ponctuellement, une station en cours de maintenance n'apparaît pas sur la carte.

Vous pouvez cliquer sur chaque station pour plus de précisions sur les mesures ou consulter :

- ▶ [Suivi des stations en direct.](#)
- ▶ [Les résultats par station.](#)
- ▶ [La fiche réseau de mesure](#) (pdf - 160 ko).

Figure 10 : Représentation de données journalières de la qualité d'air (Source : <http://www.airparif.asso.fr/stations>)

▪ Comparaison avec le Maroc :

En matière d'information, chaque pays dispose des bilans annuels et des bilans mensuels, traitent les tendances sur le long et le court terme, mais aussi de manière assez détaillée sur la situation par rapport aux dépassements des valeurs limites européennes ou nationales. Tous les gestionnaires étrangers gèrent des sites internet mettent à disposition de nombreuses données, qui sont publiques et gratuites. Assez souvent, elles sont mises à disposition sur internet en quasi-temps réel, sans étape de validation préalable, avec une mention du type « données non définitives ».

Tous les sites des pays Européens ainsi celui du EPA (USA) ont paru extrêmement riche. Toutes les données sur la qualité d'air, les documents de sensibilisation, d'information générale, d'études, sont disponibles. Il semble que cela fait défaut à ce jour au Maroc.

4.2. Communication et procédures d'alertes:

▪ Allemagne :

La communication couvre l'ensemble du grand public. Des actions de sensibilisation sont toutefois entreprises. La diffusion des données en direct sur des médias est assurée par le ministère qui gère toute la communication sur la qualité de l'air (communiqués de presse) [4].

▪ Norvège :

Les cibles de communication sont les personnes sensibles, les décideurs, les autorités locales, les médias et le corps médical. Le NILU communique via son site internet (www.nilu.no) ainsi que les radios locales sont un bon relais d'information. En cas d'urgence la communication est réalisée par les autorités locales [19].

▪ Etats Unis :

Les informations sur la qualité de l'air sont publiées dans les bulletins diffusés à la télévision. Or l'outil le plus utilisé reste AIRNow qui déclenche des procédures d'informations à partir d'un indice orange ou rouge. Sans oublier le système EnviroFlash qui fournit des informations par e-mails, relié à une page de facebook et Twitter affichant des informations en cas d'épisode de pollution [2].

▪ Tunisie :

Les données de la qualité d'air ne sont pas communiquées à la population excepté un bref descriptif de la qualité de l'air enregistrée dans les différentes stations du réseau de l'ANPE affiché par un panneau lumineux situé sur l'avenue Habib Bourguiba à Tunis (fig.11).



Figure 11 : Panneau lumineux d'information sur la qualité de l'air [14]

▪ Comparaison avec le Maroc :

La DMN communique ces produits avec les autorités locales, le Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Les Directions Régionales de Santé via des bilans mensuels et annuels.....mais cette communication est assez réduite du faite que l'information n'arrive pas au grand public, sauf une prévision de la qualité d'air au niveau du grand Casablanca via le site internet de la [DMN](#).

5. Conclusion:

De point de vue gouvernance en matière de la surveillance de la qualité de l'air des moyens forts à déployer par les directions régionaux de la DMN afin d'assurer la surveillance de la qualité de l'air et la diffusion de leur produits sur leur territoire. En plus de l'activation des comités régionaux dont le rôle de définir et mettre en œuvre les plans d'actions permettant de ramener les niveaux de pollution en dessous des seuils tolérés.

La participation des industriels dans le dispositif de la surveillance via un système d'autocontrôle des émissions raccordé au dispositif national pourrait être un ajout pour le dispositif marocain.

En matière d'installation des stations de mesure de la qualité de l'air la DMN ne dispose d'aucun droit à s'installer où il le juge utile. En plus, obtenir toutes les autorisations nécessaires reste un vrai parcours du combattant. Les stations de mesure devraient pouvoir être considérées comme des équipements publics et ne pas être sacrifiées dans le cadre de projets d'aménagement. Il conviendrait de mettre en œuvre un moyen réglementaire qui permettrait de faciliter l'installation des sites de mesure, de sécuriser le dispositif et d'assurer sa pérennisation.

En ce qui concerne les moyens utilisés pour la surveillance de la qualité de l'air, la combinaison entre l'outil modélisation et cartographie (inventaire des émissions) est l'un des moyens majeurs existant à la DMN. Il génère des études d'impact de haute résolution, afin de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. Mais la création d'un laboratoire interne pourrait être un complément majeur pour maîtriser au mieux les prélèvements sur terrain et exploiter les résultats qui en découlent.

En matière de la qualité des bilans de la qualité de l'air, on propose pour les données journalières, l'instauration d'une interface accessible permettant d'afficher les différents sites de mesure et leurs informations ainsi que les statistiques sommaires de la qualité de l'air quotidienne sous forme de tableaux, d'histogramme et de carte.

Pour les bilans annuels ou mensuels, on propose l'introduction du taux de fonctionnement des stations de mesure, et une analyse de la conformité du site de mesure peut garantir la fiabilité de la mesure aux yeux du public, sans oublier un historique des alertes.

En matière de communication de données, l'implantation d'un système de communication des données de la qualité d'air avec le grand public et des procédures d'alerte via le site internet de la DMN ainsi que les différents médias, sans oublier l'installation des panneaux lumineux de la qualité d'air au niveau des grands boulevards à l'instar de la Tunisie.

Chapitre 2

Généralités sur la pollution particulaire et la description du milieu récepteur

Ce chapitre présentera des généralités sur les particules fines (PM10), un bref aperçu sur la pollution particulaire au Maroc et la description de la zone d'étude (milieu naturel et humain) ainsi qu'un descriptif sur les émissions atmosphériques au niveau de la RGC.

1. Les Particules :

1.1. Définition :

Les particules en suspension dans l'air constituent un ensemble très hétérogène, compte tenu de la diversité de leur composition, de leur état (liquide ou solide) et de leur taille. Ces particules représentent des noyaux de condensation et peuvent être le support d'autres polluants (le dioxyde de soufre et les hydrocarbures aromatiques polycycliques par exemple).

Les particules peuvent avoir une dimension allant de 0,2 μm jusqu'à plus de 500 μm . En fonction de leur taille, les grosses particules (PM10), les particules fines (PM2.5) et les particules ultrafines (PM1) sont distinguées. Il est à noter que ce sont les aérosols de 0,5 μm à 50 μm qui contribuent le plus à la masse totale des particules [39].

1.2. Composition des particules :

Les particules peuvent avoir des compositions très différentes les unes des autres. La composition de chacune est très dépendante de sa provenance. Les poussières minérales sont principalement constituées de composés contenant du calcium, de l'aluminium, de silicium. Par contre, dans la fumée des feux de charbons ou de bois, ce seront principalement des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des métaux.

Les particules sont constituées de composés primaires (qui sont directement émis sous forme de particules) et de composés secondaires (formés par réactions chimiques dans l'atmosphère).

Les particules primaires sont représentées par les sels marins, les poussières minérales (contenant du calcium, de l'aluminium, de silicium..) et le carbone élémentaire.

Les particules de sulfate (formées par l'oxydation du dioxyde de soufre), de nitrate (formées par l'oxydation du dioxyde d'azote) et d'ammonium (formées par condensation de l'ammoniac émis dans l'atmosphère) sont d'origine secondaire.

Les particules organiques constituent une fraction significative des PM2.5. Elles sont à la fois d'origine primaire et d'origine secondaire (composés formés par l'oxydation de nombreux composés organiques volatils émis dans l'atmosphère) [39].

1.2.1. Origine :

Les particules que l'on respire proviennent à la fois des sources direct et indirect:

- **Sources directes pour les particules primaires:** Les particules primaires peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

- **Origine naturelle** : L'érosion éolienne, les feux de forêts, les éruptions volcaniques, émettent naturellement ces particules primaires. Ces dernières comprennent les embruns marins, poussières du sol, particules minérales, particules organiques, particules biologiques (pollens, champignons, bactéries, virus). Les particules d'origine naturelles sont généralement les plus grosses avec un diamètre supérieur à 2,5 μm .
- **Origine anthropique** : Elles proviennent soit des combustions (suies par exemple), soit de certains procédés industriels (cimenteries, fabrication d'engrais, etc), soit de la circulation automobile (véhicules diesel essentiellement). L'érosion éolienne, renforcée par la présence de grandes plaines cultivées, peut être source de poussières. Dans le secteur de transport, les particules proviennent des échappements, des pneus, des garnitures de frein mais également du matériau constituant la chaussée. L'usure des moteurs et de pneumatiques entraînent l'émission de particules métalliques telles que le fer, l'aluminium, le cuivre et le cadmium par exemple.
- **Sources indirectes pour les particules secondaires** : En plus des origines anthropique et naturelle, ils existent d'autres sources des particules, à savoir les remises en suspension des particules déposées au sol sous l'action du vent ou par les véhicules le long des rues, et la transformation chimique de gaz. Par exemple, dans certaines conditions, le dioxyde d'azote pourra se transformer en particules de nitrates et le dioxyde de soufre en sulfates. Ces trois sources sont à la fois les plus difficiles à quantifier et celles sur lesquelles il est le plus compliqué d'agir pour faire baisser leurs niveaux dans l'air[39].

1.2.2. Durée de vie :

Le diamètre des particules détermine le temps pendant lequel les composés en suspension restent dans l'atmosphère et la façon dont ils sont distribués. Les "grosses particules" (diamètre $>10\mu\text{m}$) se déposent rapidement sous l'effet de leurs poids, contrairement aux petites particules, PM10 (diamètre $<10\mu\text{m}$) et les PM2.5 (diamètre $<2.5\mu\text{m}$), qui peuvent rester en suspension dans l'air pendant des jours, voire des semaines, et être transportées par les vents sur de très longues distances[39].

1.2.3. Effets sanitaire :

La toxicité des particules dépend de leur taille et de leur composition. Leur rôle a été démontré dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire, notamment chez les sujets sensibles [36].

Les particules de diamètre compris entre 2,5 et 10 μm atteignent les parties supérieures du système respiratoire. Elles peuvent être éliminées par filtration des cils de l'arbre respiratoire et la toux.

Les particules les plus fines ($<2,5 \mu\text{m}$) sont les plus dangereuses. Capables de pénétrer au plus profond de l'appareil respiratoire, elles atteignent les voies aériennes terminales, se déposent par sédimentation ou pénètrent dans le système sanguin. Ces particules peuvent véhiculer des composés toxiques, allergènes, mutagènes ou cancérigènes, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les métaux. L'exposition chronique aux particules contribue à l'augmentation des risques de contracter des maladies cardiovasculaires et respiratoires, ainsi que des cancers pulmonaires.

1.2.4. Effets environnementaux :

Les particules en suspension peuvent réduire la visibilité et influencer le climat en absorbant et en diffusant la lumière. En se déposant, les particules, salissent et contribuent à la dégradation physique et chimique des matériaux. Accumulées sur les feuilles des végétaux, elles peuvent les étouffer et entraver la photosynthèse [39].

2. La pollution particulaire au Maroc :

À l'instar des pays développés, les pays émergents sont soumis à une pollution atmosphérique importante, aussi bien urbaine qu'industrielle. Le parc automobile y est souvent ancien, l'industrialisation parfois anarchique, la réglementation en matière d'émissions atmosphériques encore balbutiante et les réseaux de surveillance rares. De plus, les pays à climat aride ou semi-aride, en particulier ceux de la rive sud de la Méditerranée, sont exposés à une pollution atmosphérique particulaire d'autant plus importante qu'ils présentent des grandes zones sans couverture végétale. Les sols dénudés donnent naissance à des envols de poussières « naturelles », auxquels s'ajoutent les apports sahariens, le tout contribuant fortement à cette pollution particulaire. La contribution de ces apports aux dépassements de la norme sur les PM10 est maintenant bien montrée [23].

Les villes du Maroc sont soumises à une pollution atmosphérique particulaire élevée due au trafic automobile, à l'industrialisation, mais également à des apports terrigènes importants, liés à l'aridité du climat et à la proximité du désert. Les réseaux de surveillance étant encore peu développés.

Au vu de la dangerosité de ces particules, il apparaît nécessaire de développer les études dans les villes marocaines, tant sur les niveaux de pollution que sur leurs effets sanitaires et environnementaux.

Pour les raisons précitées on propose comme un des objectifs de ce travail de cartographier la répartition spatiotemporelle des PM₁₀ sur la région du Grand Casablanca. Elle consiste à une étude de dispersion de PM₁₀ par modélisation numérique avec le modèle de qualité de l'air AERMOD et le dernier cadastre des émissions atmosphériques pour une simulation complète de l'année 2014.

3. Description du milieu récepteur (zone d'étude):

3.1. Situation géographique :

La RGC (33° 34' 42.44" N 7° 36' 23.89" W) est située sur la côte Atlantique, au Centre Ouest du Maroc (fig.12). Elle est délimitée par l'océan Atlantique à l'ouest et La région de Chaouia - Ourdigha au nord, à l'est et au sud la Province de Settat [34].

La région s'étend sur une superficie de 1615 km² soit environ 0.16% de la superficie totale du royaume.

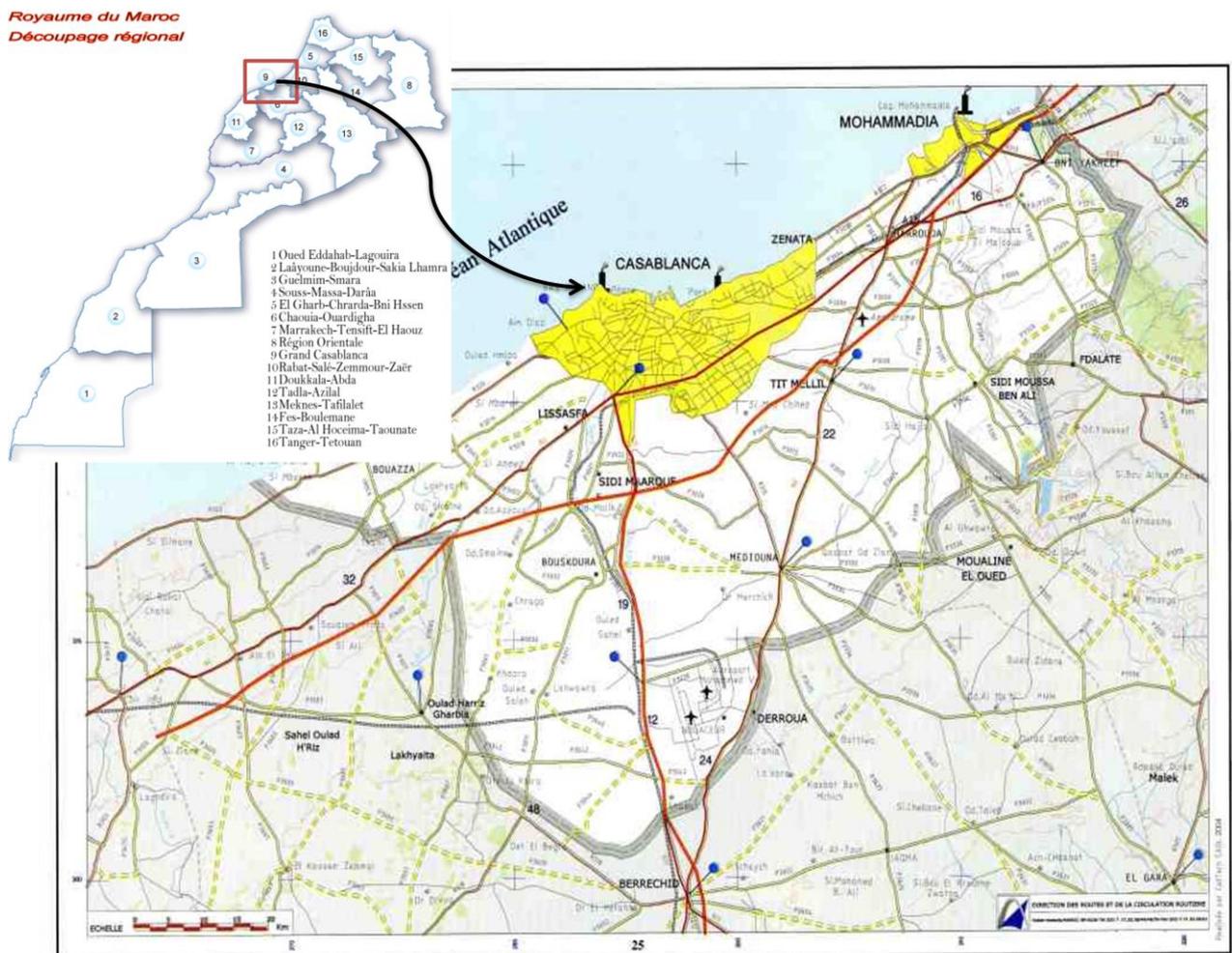


Figure 12: situation géographique du Grand Casablanca

3.2. Milieu naturel et humain :

3.2.1. Milieu naturel :

3.2.1.1. Cadre naturel:

Il se compose de Plaines et plateaux avec de petites collines éparpillées dans le territoire limitrophe de la ville de Casablanca et une Façade maritime de près de 98 km, prolongée par celle de Mansouria de 22 Km. Le sol est diversifié avec une majeure partie de l'espace rural et sableux dans la zone littorale. Les cours d'eau qui drainent la région sont des rivières de faible importance quant au volume d'eau apporté. On y trouve Oued El Malleh qui se déverse près de la ville de Mohammedia, Oued N'fifikh à Mansouria et Oued Hassar dans la Commune Rurale d' Echlalate [18].

La forêt couvre près de 4 000 ha dans la région du Grand Casablanca, soit moins de 4% du territoire et environ 10 m² par habitant. Les principaux boisements sont :

- Forêt de Bouskoura (3 000 ha) ;
- Forêt de l'oued N'fifikh (270 ha) ;
- Forêt de l'oued Maleh (340 ha) ;
- Forêt de Krouta (210ha).

Le reste des forêts est réparti sur les dunes côtières au niveau de :

- Dar Bouazza et tamaris (130 ha);
- Sidi Abderrahmane (50 ha).

3.2.1.2. Cadre climatique:

Le climat de la région du Grand Casablanca est de type océanique. Il est doux et pluvieux en hiver et humide et tempéré en été avec absence de gelée en hiver et forte humidité durant l'année. La température minimale est de 7°C et maximale de 27°C. Afin de caractériser l'aspect climatologique de la région on a utilisé les données de la station de Casa-Anfa qui se trouve dans la ville de Casablanca à 3 km de la côte et celle de Nouaceur localisée au niveau de l'aéroport de Mohamed V à environ 27 km de la côte (fig.13).

Les signatures en termes de précipitation sont assez similaires et l'hiver apparaît comme la saison la plus pluvieuse alors que les mois de juillet août sont secs (fig.14).

On note aussi que les cumuls semblent légèrement supérieurs à Casa-Anfa, que sur Nouaceur (fig.14). On dépasse en effet les 60 mm en janvier et décembre sur casa-Anfa ; ce qui n'est pas le cas sur la station de Nouaceur.

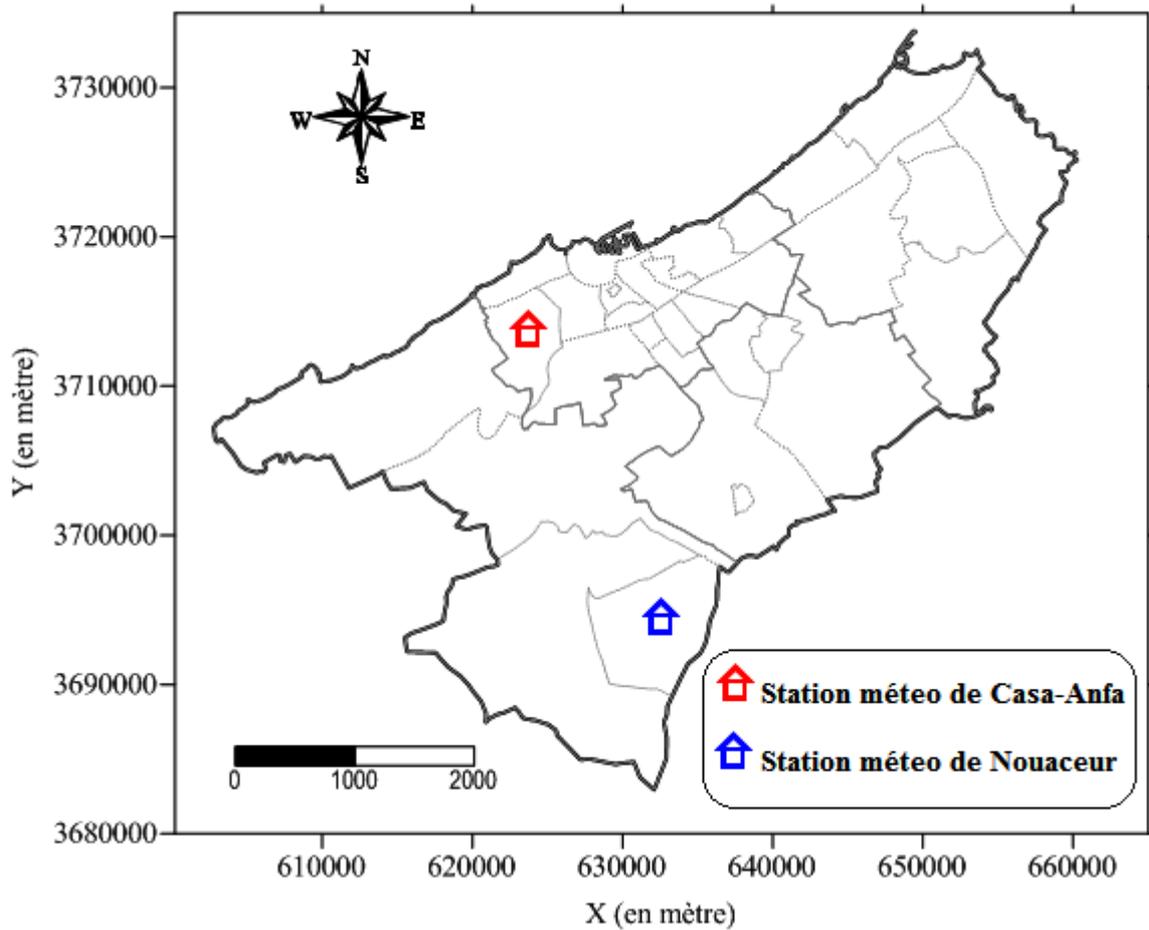


Figure 13 : Localisation des stations météorologiques

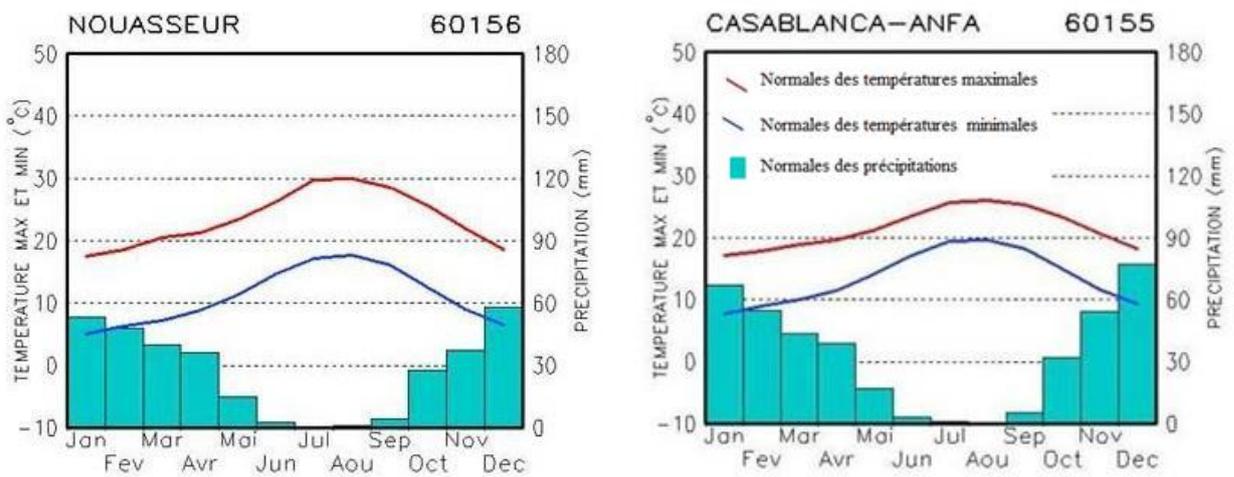


Figure 14 : Normales des températures maximales et minimales et des précipitations sur 30 ans pour les stations de Nouasseur et Casa-Anfa (Source : DMN)

La RGC comme les autres régions côtières du Maroc est bien évidemment soumise aux brises marines. Cependant, l'été connaît principalement des vents doux de nord-est au nord-ouest tandis qu'automne les vents sont plus marquées et soufflent principalement du nord-ouest.

3.2.2. Situation démographique :

La ville de Casablanca a connu une extension rapide et une croissance démographique accrue. Elle concentre près de 12.6 % de la population totale du pays. Sa population est estimée à 4 270 750 habitants en 2014 avec 819 954 ménages. Les plus fortes densités de population sont situées à Al Fida Mers Sultan, Molay Rachid et Ben Msick. Les provinces les moins peuplées sont Médiouna et Nouaceur [13].

La progression de la population du Grand Casablanca s'accompagne de l'augmentation de la production industrielle des activités destinées au marché intérieur comme l'agroalimentaire, l'artisanat, et l'énergie.

3.3. Equipements et infrastructures :

3.3.1. Infrastructures routières :

Le grand Casablanca dispose d'un réseau routier qui s'élève à 5 65 km (104 km de routes nationales, 60 km de routes régionales et 401 km de routes provinciales). Le réseau rural comporte 72 km non revêtus représentant un taux de couverture spatiale de 0,50 km/km² [18].

Le parc automobile de la RGC constitue 34,53 % du parc automobile du Maroc (fig.15). Il a augmenté de 777506 pendant 2006 à 1187233 en 2014 [38].

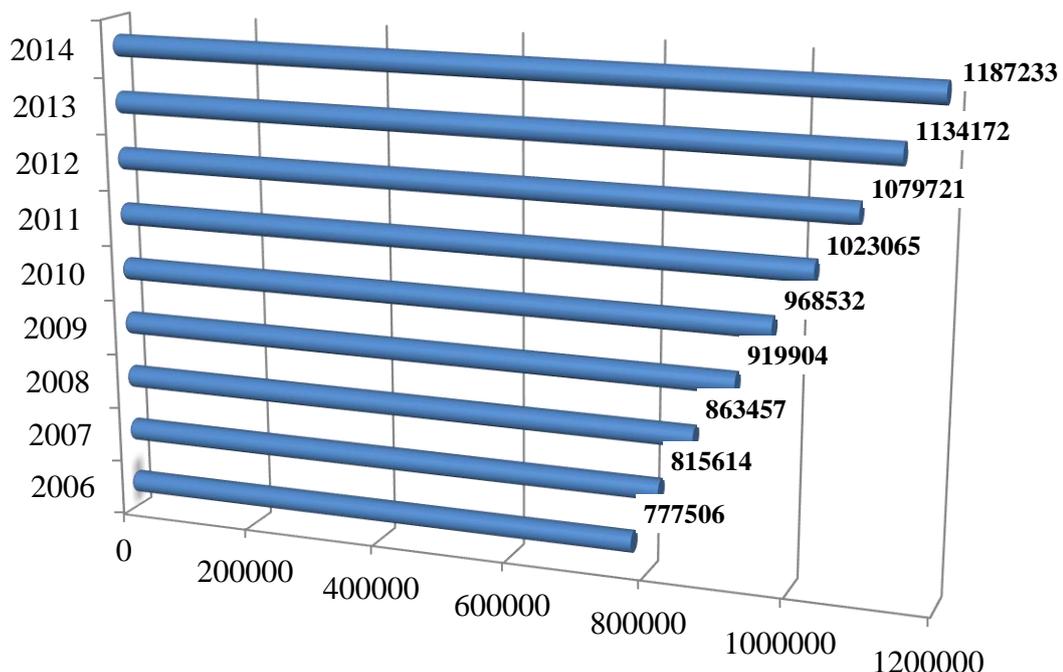


Figure 15: Evolution du parc automobile de la RGC entre 2006 et 2014

3.3.2. Infrastructure portuaire :

La Région du Grand Casablanca est dotée de deux grands ports (fig.16) :

Le Port de Casablanca : à vocation commerciale qui assure près de 35,5% du trafic de marchandises à travers les ports du Royaume. Il est le deuxième grand port d'Afrique, et dotés des infrastructures suivants [20] :

- Un quai de commerce englobant :
 - ✓ un môle Tarik (pêche, conteneurs et rouliers) ;
 - ✓ un môle de commerce d'une longueur de 1810 ml ;
 - ✓ un môle des agrumes de 1680 ml;
 - ✓ un môle des phosphates de 1180 ml et un terminal à conteneurs de 380 ml.
- Un port de plaisance touristique : qui s'étend sur 300 ml de longueur
- Un port de pêche : d'une longueur de 370 ml.

Le port de Mohammedia : est considéré comme étant le premier port pétrolier du pays avec 74,7% du trafic pétrolier national [20].

Il a également une vocation de commerce et de pêche. Ses infrastructures se composent de :

- Un terminal pétrolier ;
- Un port de pêche ;
- Un quai de commerce d'une longueur de 290 m ;
- Une jetée principale de 2800 ml de longueur ;
- Deux digues secondaires de 396 et 168 ml.

3.3.3. Infrastructure aéroportuaire :

L'aéroport Mohamed V (fig.16) constitue la pièce maîtresse du trafic aérien dans la région voire même dans le pays. Au titre de l'année 2008, environ 48,3% des voyageurs au niveau national sont passés par l'aéroport Mohamed V contre 90,5% pour le fret. La superficie du parking avions de l'aéroport Mohamed V est estimée à 250 000 m². Il est doté de trois terminaux d'une capacité de plus de 11 millions de passagers par an [13].

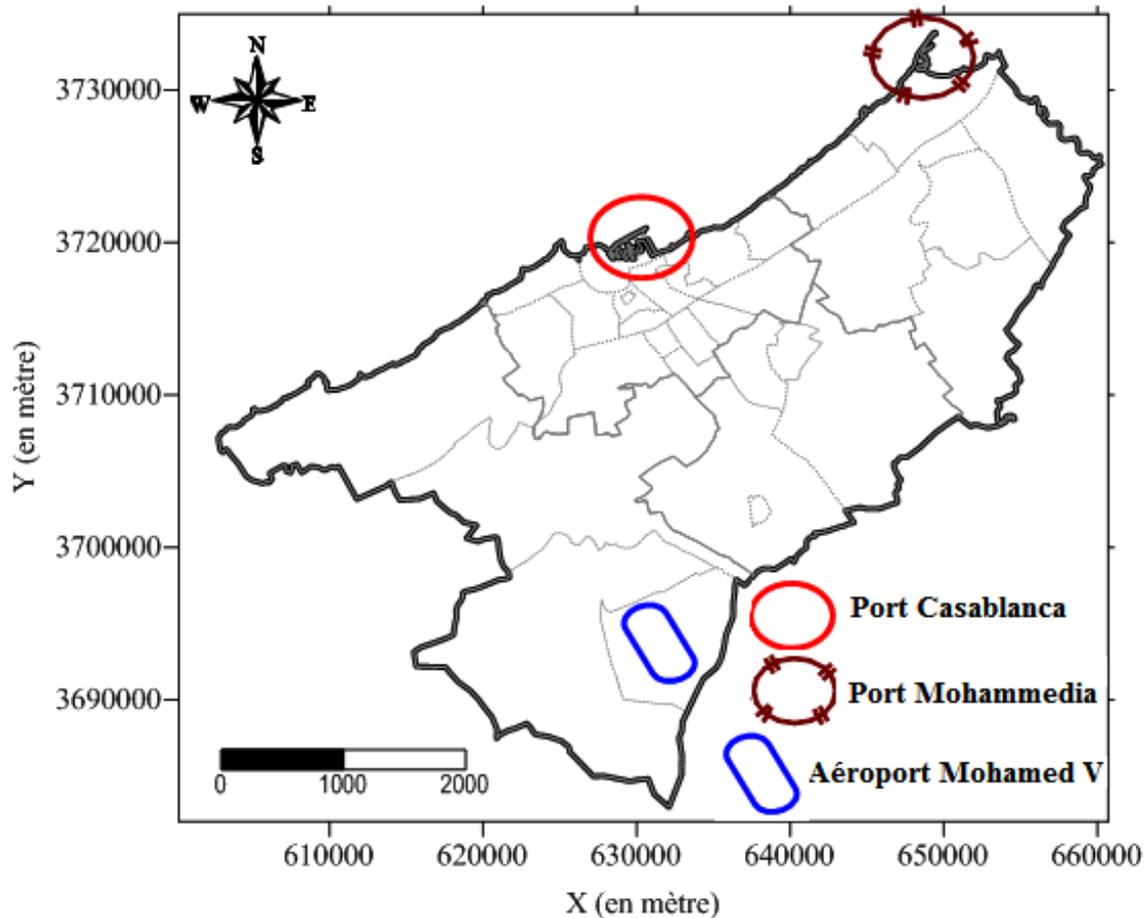


Figure 16 : Infrastructures portuaire et aéroportuaire

3.3.4. Infrastructure ferroviaire :

Le réseau ferroviaire s'étend sur une longueur de 80 km. Plusieurs centres urbains de la région traversés par ce réseau sont équipés de gares pour le transport des voyageurs et des marchandises.

3.4. Secteurs économiques :

3.4.1. Agriculture :

L'agriculture reste un secteur non négligeable au niveau du grand Casablanca vue qu'elle bénéficie d'un climat favorable et d'une superficie agricole utilisée de près de 68 000 hectares sur les 114 000 hectares de terre de la ville.

3.4.2. Industrie :

La région du Grand Casablanca, capitale économique du royaume, continue de renforcer sa position de leader dans l'industrie nationale. En effet elle concentre 2689 établissements (fig.17) industriels, soit près de 34% du total des établissements industriels au niveau national, notamment dans les domaines des métaux et de l'agroalimentaire [12].

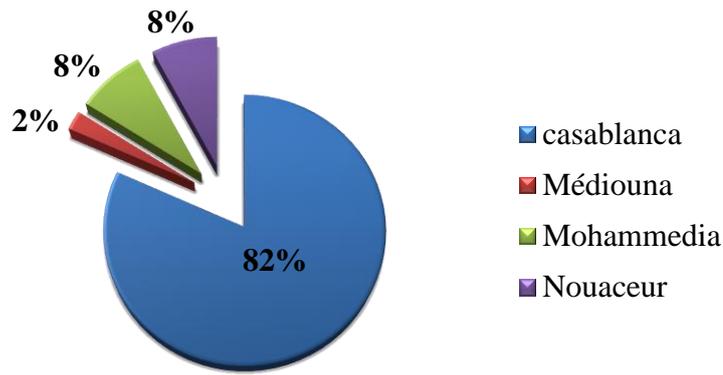


Figure 17 : Répartition des grandeurs industrielles par préfectures et provinces

3.4.3. Energie et mine :

✓ Energie :

Le secteur de l'énergie est un secteur stratégique dans la mesure où il comprend d'importantes installations énergétiques dont la raffinerie de la SAMIR installée à Mohammedia et qui produit près de 80 % du pétrole raffiné au niveau national ainsi les centrales thermiques installées dans la région. Il s'agit de la centrale thermique de Roches Noires et de Tit Mellil à Casablanca et la centrale thermique de Mohammedia. Ces centrales ont produit ensemble 2 871,4 Millions de kwh, soit 17,8% de la production thermique d'électricité [18].

✓ Mine :

L'activité minière dans la RGC est limitée à l'exploitation du gisement de sel de Mohammedia les principales installations para-minières de la région concernent la fabrication d'explosifs et le dépôt de stockage d'explosifs (21 dépôts) [17].

3.5.Problèmes environnementaux :

3.5.1. Problèmes de gestion des déchets :

Les décharges sauvages existantes au niveau de la Grand ville du Casablanca engendrent un certain nombre de problèmes environnementaux, tels que l'infiltration des lixiviats, les odeurs, la contamination des sols et des eaux et la prolifération des vecteurs de maladies.

3.5.2. Pollution de l'eau :

L'absence ou le manque de raccordement au réseau d'assainissement dans certaines zones de la RGC engendre le plus souvent des rejets directs dans la nature.

Les eaux de surface de la région présentent une qualité généralement dégradée. En effet, les mesures relevées au niveau des stations situées sur Oued Hassar montrent sa mauvaise qualité.

Les rejets des eaux usées génèrent la pollution d'Oued Bouskoura (Province de Nouaceur) et d'Oued El Maleh (Préfecture de Mohammedia).

Les eaux souterraines au niveau de la région, représentées par les nappes de Berrechid et la Chaouia, sont aussi de mauvaise qualité [17].

3.5.3. Dégradation de la qualité de l'air :

En matière de pollution atmosphérique, il convient de noter l'importance des nuisances le long des principaux axes routiers desservant le port de Casablanca, générées par un trafic routier intense et aggravées par les mauvaises conditions de circulation, mais aussi par un parc de véhicules souvent ancien et très polluant.

L'activité industrielle très développée au niveau de la région engendre des émissions atmosphériques importantes, avec un impact direct sur la santé, issues principalement de la concentration des unités polluantes au niveau de la région.

3.6. Problèmes sanitaires :

Le profil épidémiologique est en transition et enregistre l'émergence de pathologie chronique telles que les maladies cardiovasculaires, l'hypertension, les cancers, le diabète, etc. Cette transition s'explique, certes, par l'augmentation de l'espérance de vie ; changement de modes de vie, mais aussi par les agressions modernes que subit l'environnement.

Plusieurs études ont mis en évidence la relation entre le degré de la pollution atmosphérique et celle de la santé de la population. L'accroissement du risque pour la santé, en termes de mortalité et de morbidité (taux d'individus malades au sein d'un groupe durant un certain temps) en relation avec les augmentations des niveaux de fumées noires (particules en suspension dans l'air mesurant moins de 3 μm), a fait l'objet d'une étude, Casa-Airpol, menée en 1998-1999 dans l'agglomération de Casablanca. Une deuxième étude, réalisée entre novembre 2001 et Avril 2002 à Mohammedia sur un échantillon d'enfants asthmatiques, a montré des relations statistiquement significatives entre le niveau de pollution atmosphérique mesuré pour les teneurs en SO_2 et la fréquence de crise d'asthme [10].

4. Emissions atmosphériques dans la RGC :

4.1. Inventaire d'émissions atmosphériques de 2010 :

L'inventaire des émissions atmosphériques de la RGC de 2010 concerne les principaux polluants atmosphériques générés par les sources d'émissions ponctuelles, linéiques, surfaciques et volumiques. La liste des polluants pris en compte est limitée à 5 polluants ayant un impact sur la qualité de l'air et la santé de la population il s'agit de : SO₂, NO₂, PM10, C6H6 et CO [20].

4.1.1. Les Sources d'émissions prise en compte :

-Emissions aéroportuaires sont essentiellement attribuables à l'aéroport Mohammed V situé sur le territoire de la province de Nouaceur à environ 30km au sud de Casablanca. Les principales sources d'émissions atmosphériques de l'aéroport sont [20] :

- ✓ Le trafic aérien principalement lors des cycles atterrissage-décollage (LTO),
- ✓ La circulation du parc de véhicules de service sur le domaine de l'aéroport,
- ✓ La chaudière de l'aéroport.

-Emissions portuaires sont liées au trafic des navires, au changement de matières pulvérulentes et au trafic de camions sur les sites portuaires. La RGC est dotée de deux zones portuaires :

- ✓ Le port autonome de Casablanca situé en zone urbaine. C'est le port de commerce ; conteneurs et minerais, marchandise diverses et port de plaisance.
- ✓ Le port pétrolier de Mohammedia distant de «23km du port de Casablanca » est implanté dans la partie sud de la baie de Mohammedia. Il est situé en zone urbaine et est relié aux principaux axes de circulation, en particulier à Casablanca par l'autoroute Casa-Rabat.

-Emissions de trafic routier sont de deux types :

- ✓ Les émissions de trafic routier principal lié aux émissions des principaux axes routiers (GSL) de la RGC.
- ✓ Les émissions de trafic routier secondaire lié aux émissions des rues et routes modestes non retenues comme GSL.

-Emissions industrielles concernent les émissions industrielles canalisées de 20 unités industrielles et les émissions diffuses (lanterneaux et ouvertures de halles industrielles, circulation d'engins sur des pistes, etc.).

-Emissions Résidentielles et tertiaire concernent les émissions de chauffage domestique et des locaux mais aussi l'utilisation d'eau chaude et les activités de cuisson. Le secteur tertiaire, proprement parlé, regroupe les activités des bureaux, des commerces, des cafés-hôtels-restaurants, de l'enseignement, de la santé, des habitats communautaires, du transport et des sports et loisirs.

4.1.2. Synthèse des émissions atmosphérique dans la RGC :

La synthèse des émissions atmosphérique dans la RGC, établie à partir de la détermination des quantités des 5 polluants rejetées par les différentes sources d'émission (tab.3), révèle que :

- Le transport routier et l'industrie, sont les deux sources principales d'émissions d'oxydes d'azote, avec une contribution d'environ 92%.
- La majorité des émissions de SO₂, PM₁₀, provient des secteurs industriels.
- L'oxyde de carbone (CO), le benzène (C₆H₆) et Les composés organiques volatiles totaux (COV_{Tot}) sont émis essentiellement par le transport routier.

Tableau 3 : Inventaire 2010 des émissions de la RGC (Emission en t/an) [20]:

	NO ₂	SO ₂	CO	C ₆ H ₆	COV	PM ₁₀
Emissions aéroportuaire	375.2 1.2%	46.5 0.1%	339.2 3.1%	1.0 1.9%	48.4 3.4%	4.5 0.1%
Emission portuaire	1461.7 4.7%	870.9 1.8%	255.5 2.4%			
Emissions routière	13745.0 44.1%	74.0 0.2%	6806.0 63.1%	39.0 70.9%	973.0 67.9%	811.0 12.6%
Emissions industriels	15172.0 48.6%	47391.0 98.0%	3217.0 29.8%	15.0% 27.3%	334.0 23.3%	5617.0 87.3%
Emissions des secteurs résidentiel/tertiaire	436.1 1.4%	0.2 0.0%	163.4 1.5%	0.0 0.0%	78.0 5.4%	1.5 0.0%
Emissions totale	31195.4	48382.6	10780.8	55.0	1433.8	6434.0

4.1.3. Synthèse des émissions atmosphérique par catégorie de source [20]:

- **Grande source ponctuelle (GSP)** : Il s'agit de 47 sources industrielles bien identifiés et quantifiés sur une base annuelle et d'une seule source aéroportuaire (chaudière de l'aéroport de Mohamed V).
- **Grande sources linéaire (GSL)** : Il s'agit des grands axes routiers avec un trafic important, situés en zone urbaine, rurale ou autoroute.
- **Sources surfaciques (SSURF)** : Il s'agit des émissions de 8 sources dues au trafic portuaire des deux ports de la RGC.
- **Sources volumiques (SVOL)** : Ces sources sont constituées par toutes les autres sources qui ne sont pas regroupées dans les catégories GSP ou GSL c-a-d les sources qui ne peuvent pas être individualisées ; par exemple des petites installations industrielles, des activités artisanales ; des activités domestique (chauffage) ; des activités de loisir, le trafic routier local sur des routes d'importance moyen à faible (réseau routier secondaire) et des zones agricoles.

La synthèse des émissions dans la RGC par catégories de sources (tab.4), montre que :

- la majorité des polluants sont issus des GSP.
- Les SVOL émettent au niveau de l'atmosphère plus que 44% des COV.

Tableau 4 : Inventaire 2010 des émissions de la RGC (Emission en t/an) [20]

	NO2	SO2	CO	C6H6	COV	PM10
GSP	15180.2 48.7%	47406.0 98.0%	3219.0 29.9%	1061.1 96.3%	334.1 23.3%	5618.2 87.3%
GSL	6553.0 4.7%	33.0 1.8%	3243.0 2.4%	19.0 1.7%	463.0 32.3%	386.0 6%
SVOL	7995.1 25.6%	72.5 0.1%	4063.6 37.7%	21.9 2%	636.3 44.4%	429.8 6.7%
SSURL	1467.1 4.7%	870.9 1.8%	255.5 2.4%			
Total	31195.4	48382.4	10781.1	1102.0	1433.4	6434.0

Chapitre 3

La Modélisation de la dispersion atmosphérique

Ce chapitre a pour but d'exposer une vue générale sur la modélisation de la dispersion atmosphérique. La première partie consiste à la présentation des différents paramètres régissant sur la dispersion des polluants. Ensuite une présentation détaillée du système de modélisation AERMOD utilisé dans le cadre la cartographie de la pollution particulaire au niveau de la RGC en 2014.

1. Généralités sur la modélisation de la dispersion atmosphérique :

1.1.Introduction :

La modélisation de la dispersion atmosphérique est une simulation de la dispersion des panaches dans un contexte et une temporalité donnée, réalisée à l'aide des outils mathématique et des logiciels informatique et cartographique. Elle a pour but de connaître en tout point de l'espace et à tout instant les concentrations en polluants mais aussi d'estimer l'impact des polluants sur les écosystèmes.

1.2.Phénomène influençant sur la dispersion atmosphérique :

La dispersion et le transport des polluants dans l'air dépendent de l'état de l'atmosphère et des conditions météorologiques (turbulence atmosphérique, vitesse et direction du vent, ensoleillement, stabilité de l'atmosphère, etc.) et topographiques (Effet canyon, Rugosité de surface, etc.) [35].

1.2.1. Vitesse et la direction du vent :

Le vent est un paramètre météorologique important pour le transport et la dispersion des polluants. Il intervient à toutes les échelles tant par sa direction que par sa vitesse.

L'influence du vent sur la pollution atmosphérique est très variable selon la position de la source. Généralement la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Au fur et à mesure que les polluants s'élèvent, la dispersion est facilitée par le vent. Plus le vent est fort, plus les niveaux de pollution seront bas. En revanche, un vent de faible vitesse favorise l'accumulation locale des polluants [35].

1.2.2. Turbulence atmosphérique :

L'atmosphère est constamment animée de mouvements qui se traduisent par des variations plus ou moins rapides de la vitesse et de la direction du vent.

Ces mouvements ont plusieurs origines : convection thermique, présence de reliefs, etc. Les mouvements à petite échelle brassent les masses d'air et permettent la dilution des polluants alors que les mouvements à plus grande échelle vont en assurer le transport. Plus la turbulence est importante, plus la dispersion atmosphérique est meilleure [35].

1.2.3. L'influence de la pression atmosphérique :

Les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc à de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions), où la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants, entraînent des épisodes de pollution.

1.2.4. Ensoleillement et la température :

L'ensoleillement provoque un réchauffement des sols et des surfaces. Ceci entraîne des phénomènes de convection qui sont à l'origine de mouvements verticaux et horizontaux de l'atmosphère. L'ensoleillement agit également sur la chimie des polluants: l'énergie solaire (notamment les ultra-violets) peut "casser" certaines molécules dans l'air et ceci favorise la formation photochimique de l'ozone dans la troposphère [35].

1.2.5. Inversion thermique (gradient vertical de température) :

La température de l'air décroît habituellement avec l'altitude. Ceci permet une bonne dispersion verticale en favorisant la montée de masses d'air près du sol, celles-ci étant plus chaudes, et donc plus légères.

En situation normale de diffusion, la température diminue avec l'altitude. La structure thermique de l'atmosphère ne freine pas la diffusion des polluants.

Parfois, à partir d'une certaine hauteur, la température peut augmenter avec l'altitude. Il y a alors inversion thermique : une couche d'air chaud se trouve au-dessus d'une couche d'air plus froid. L'air pollué, qui se disperse vers le haut en situation normale de diffusion, est alors bloqué par cette couche d'air plus chaud .qui agit comme un couvercle thermique [35].

1.2.6. Stabilité et instabilité atmosphérique :

La stabilité de l'atmosphère joue un rôle déterminant dans la dispersion des polluants. Elle est défini par rapport à une droite de variation de température théorique, celle d'un volume d'air qui s'élève dans l'atmosphère stable et se détend lentement (à cause de la diminution de pression) sans échange de chaleur avec le milieu avoisinant, c'est le gradient adiabatique sec, aussi appelé droite de neutralité thermique ou neutre.

La température de l'air décroît au fur et à mesure que l'altitude augmente, à raison de +/- 10 degrés par km, à cause de la diminution de pression régnant dans l'air. Mais la variation de température en fonction de l'altitude s'écarte le plus souvent de cette situation. Deux cas peuvent être rencontrés (fig.18) :

- Cas n°1 : une situation instable, si la température diminue plus vite que le neutre; un volume d'air s'élevant aura tendance à être plus chaud que l'air avoisinant, donc plus léger, et tendra à accélérer de plus en plus. Il apparaît alors des phénomènes de courants verticaux ce qui favorise la dispersion verticale de polluants.
- Cas n°2 : une situation stable qui freine la dispersion verticale des polluants, si la température diminue moins vite que le neutre; un volume d'air s'élevant aura tendance à être moins chaud que l'air avoisinant, donc plus lourd, et tendra à ralentir ou à redescendre.

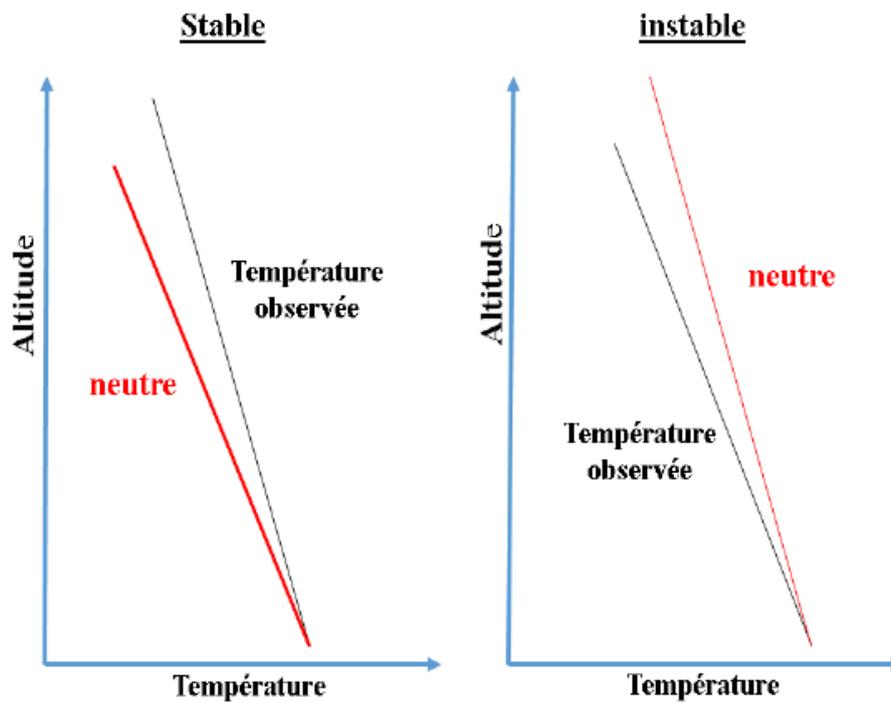


Figure 18 : Les Situations de stabilité et instabilité atmosphériques [35]

1.2.7. Les précipitations:

Les précipitations nettoient l'atmosphère en entraînant une partie des poussières et des polluants qu'elle contient vers le sol. Pour les particules, l'efficacité de cette élimination diminue avec la dimension des particules (les plus grosses sont plus facilement nettoyées). De plus, les précipitations se montrent encore favorables à la dispersion des polluants, par le fait qu'elles provoquent le brassage de l'air et engendrent par conséquent des turbulences et l'instabilité des basses couches atmosphériques [35].

1.2.8. Brises de mer et de terre :

Le long des côtes ou des grands lacs, la différence de température entre la terre et l'eau suffit à établir des courants d'air locaux de la mer vers la terre le jour (brise de mer), et de la terre vers la mer la nuit (brise de terre). Les polluants épargnent lorsque le vent souffle de la terre vers la mer (fig.19) ; en revanche, les lieux habités sont particulièrement touchés quand le vent souffle de la mer vers la terre[35].

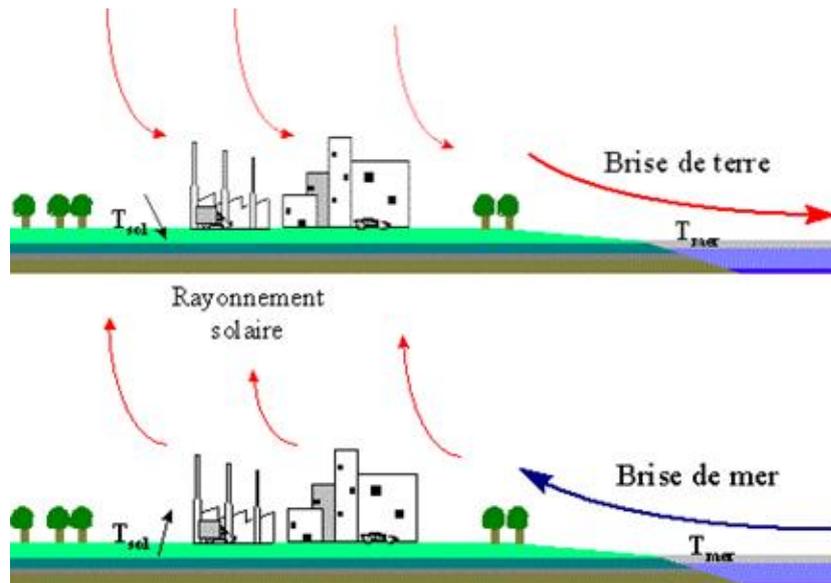


Figure 19 : Brise de mer et de terre [35]

1.2.9. Brise de campagne (Effet de cloche) :

Les bâtiments et les différentes activités au sein d'une agglomération (transport, chauffage, etc) changent les caractéristiques thermiques de l'air. L'agglomération constitue un îlot de chaleur qui subsiste à la tombée du jour, tandis que la campagne environnante se refroidit. L'air chaud s'élève au-dessus de la ville, provoquant alors une dépression qui attire l'air plus frais des campagnes alentours. Les polluants émis à la périphérie de l'agglomération sont alors véhiculés vers le centre-ville (fig.20) où s'installe une atmosphère fortement polluée [35].

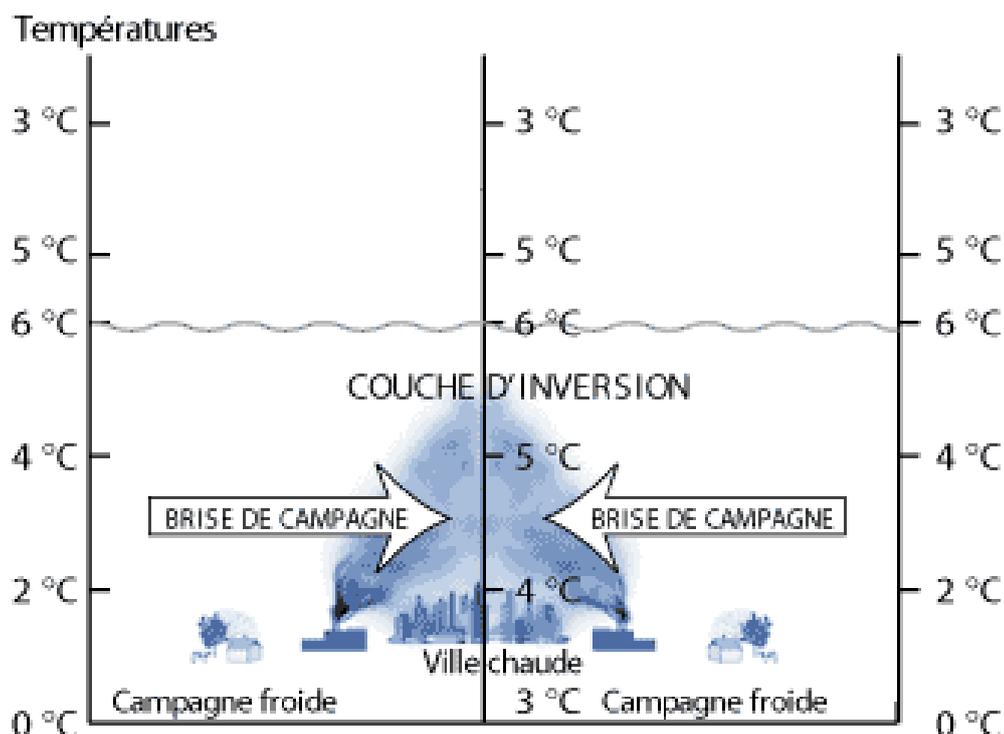


Figure 20 : Brise de campagne [35]

1.2.10. Effet canyon :

L'effet canyon est du même type que l'effet de cloche, cependant il s'applique à l'échelle de la rue. Il apparaît lorsque les bâtiments sont de hauteur importante par rapport à la largeur de la rue, en particulier si un seul côté est ensoleillé et si le trajet est tortueux. Il s'instaure alors une circulation "cellulaire" qui ralentit les échanges avec les couches supérieures et tend à accumuler les polluants émis dans la rue [35].

1.2.11. Rugosité et revêtement du sol :

La rugosité et le revêtement du sol influencent l'écoulement des flux gazeux, et par conséquent, la dispersion des polluants. Un sol rugueux augmente la turbulence et stimule le dépôt des particules par capture aérodynamique. Le type de couverture du sol influence la quantité de polluants éliminés par dépôt sec. Pour les particules, le revêtement joue un rôle important (érosion des sols, remise en suspension des particules déposées, etc.) [35].

1.3.Principe de base d'un modèle de dispersion :

Les modèles de dispersion sont pour la plupart basés sur la résolution de l'équation d'advection-diffusion. Cette dernière représente un bilan de matière effectué dans l'atmosphère sur un champ scalaire par les processus d'advection par le vent et de diffusion turbulente et moléculaire. En utilisant la décomposition de Reynolds, l'équation d'advection-diffusion est représentée sous sa notation einsteinienne par [37] :

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \underbrace{u_j}_{II} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = \underbrace{\nu_c}_{III} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x_j^2} + \underbrace{\dot{S}_c}_{IV} - \underbrace{\frac{\partial (\overline{u'_j c'})}}_{V} \frac{\partial}{\partial x_j}$$

I : représente la tendance de la concentration,
II : décrit l'advection du traceur par le vent moyen,
III : représente la diffusion moléculaire moyenne du traceur,
IV : est la production du traceur dans le système étudié
V : représente la divergence du flux turbulent.

1.4.La typologie des modèles de dispersion :

Les principaux types de modèles de dispersion atmosphérique sont les modèles boîtes, eulériens, lagrangiens, gaussiens, à bouffées ainsi que les modèles de mécanique des fluides numériques [7]. Ils sont brièvement décrits dans le tableau ci-dessous (tab.5) :

Tableau 5 : Les types de modèles de dispersion [7]

Type de modèle	Description du modèle
Modèle de boîtes	Il considère que le domaine de modélisation est un large volume, sous forme de boîte ou de colonne, homogène et que les émissions entrant dans ce volume se mélangent de manière instantanée et uniforme. Ce type de modèle est habituellement utilisé afin d'étudier la pollution photochimique.
Modèle eulérien	Il adopte un système référentiel fixe et génère comme résultats des champs de concentration en quatre dimensions (trois dimensions de l'espace plus le temps) pour chaque polluant étudié.
Modèle lagrangien	Il divise les émissions de contaminants en des particules virtuelles qui sont suivies individuellement au fur et à mesure de leur déplacement d'où son principal inconvénient, qu'il requière beaucoup de calculs étant donné qu'il faut suivre les trajectoires de plusieurs milliers de particules afin d'obtenir des résultats statistiquement représentatifs.
Modèle gaussien	Les hypothèses simplificatrices d'homogénéité horizontale et d'invariance des émissions et des conditions météorologiques sont posées, de sorte qu'une solution analytique à l'équation d'advection-diffusion est obtenue. Les calculs étant simplifiés, le temps de simulation est plus court ce qui explique sa popularité.
Modèle à bouffée	Une sorte de fusion des concepts des modèles lagrangien et gaussien, il est utilisé pour étudier le transport et la diffusion à la méso-échelle de composés dont les transformations chimiques ou radioactives peuvent être représentées par des formules de décroissance de concentration en fonction du temps.
Modèle mécanique des fluides numériques	basé sur les équations de Navier-Stokes, très sensible aux conditions initiales. il requière un grand nombre d'intrants qui doivent être définis de manière détaillée, ce qui induit la lourdeur des calculs, et le temps de simulation est généralement long.

1.5. Les entrées / sorties standard d'un modèle :

1.5.1. Données d'entrée standard d'un modèle :

Les simulations effectuées à l'aide des modèles de dispersion prennent en considération de nombreuses données d'entrée, ces données sont relatives :

- Aux sources émissions

- Aux récepteurs
- Au site
- Aux conditions météorologiques à la dispersion.

1.5.2. Données de sortie standard d'un modèle :

Les sorties indispensables d'un modèle de dispersion atmosphérique sont :

- L'emplacement et la concentration pour différentes conditions de vitesse du vent et de stabilité atmosphérique.
- Les concentrations à différentes distances à la source.
- Les concentrations sur des emplacements arbitraires sur une grille.

2. Système de modélisation AERMOD :

AERMOD est un système de modélisation de la dispersion atmosphérique développé par AERMIC et recommandé par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA). Le système de modélisation est constitué de trois préprocesseurs (AERMET, AERMAP et BPIPFRM) et un modèle de dispersion (AERMOD) (fig.21) :

- ✓ AERMET est le préprocesseur météorologique,
- ✓ AERMAP est le préprocesseur de terrain qui caractérise le terrain, et qui génère les grilles réceptrices et facilite la génération des échelles de hauteur de la colline,
- ✓ Le préprocesseur BPIPFRM (Building Profile Input Program for PRIME), qui permet d'incorporer l'effet des bâtiments dans le modèle AERMOD,
- ✓ Le modèle de dispersion AERMOD, qui utilise les données météorologiques d'AERMET et les données de terrain et de récepteur pour produire des fichiers de sortie.

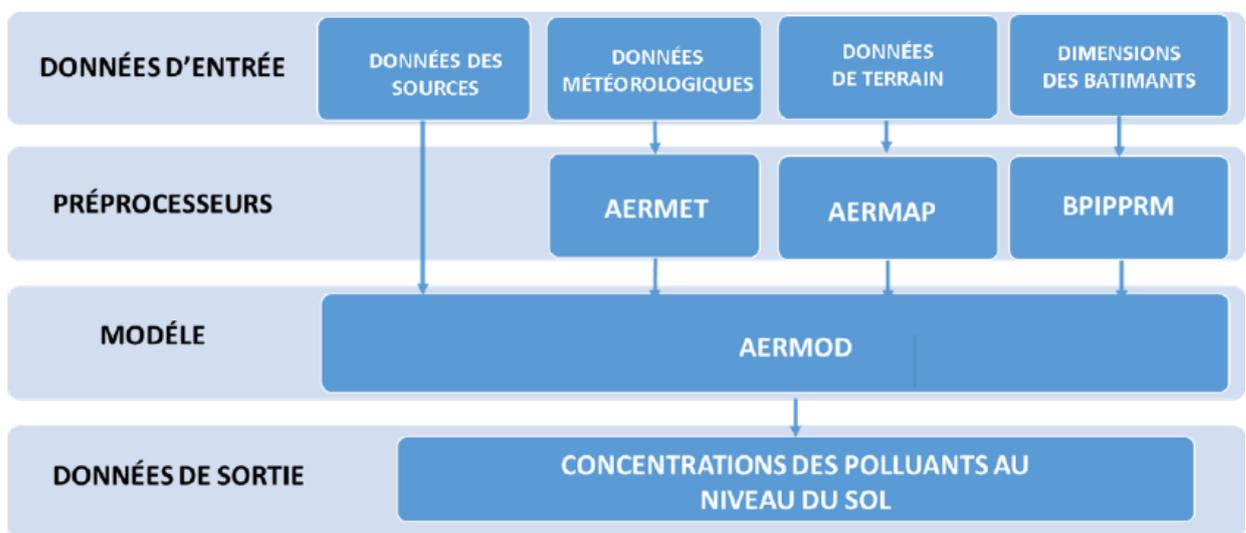


Figure 21 : Structure du système de modélisation (Source : EPA)

2.2. Préprocesseurs du modèle AERMOD :

2.2.1. Préprocesseur AERMET :

AERMET est un préprocesseur qui utilise des mesures météorologiques, représentative du domaine de modélisation, pour calculer certains paramètres de la couche limite atmosphérique (CLA) utilisées dans le modèle AERMOD. AERMET intègre les paramètres sur l'utilisation du sol (albédo, rapport de Bowen, rugosité) et les données météorologiques mesurées en surface et en haute altitude (mesures aérologiques) afin d'obtenir les profils verticaux de la vitesse du vent, les fluctuations turbulentes verticales et latérales, le gradient de température, etc.

Le calcul des paramètres de la dispersion par AERMET se fait selon l'état de la Couche limite atmosphérique [7] :

- Couche limite atmosphérique stable (CLS),
- Couche limite atmosphérique instable ou convective (CLC).

2.2.1.1. Couche limite atmosphérique (CLA) :

La couche limite atmosphérique (ou planétaire) est la couche de l'atmosphère terrestre Située entre la surface (terre et mer), où le frottement ralentit le déplacement de l'air ; et l'atmosphère libre où le frottement devient négligeable. L'épaisseur de cette couche varie entre 0,5 et 3 km. Celle-ci est formée par la superposition de deux couches distinctes, à savoir la couche de surface (quelques dizaines à la centaine de mètres), et la couche d'Ekman (de l'ordre du kilomètre).

- **Stabilité et l'instabilité de la CLA :**

- ✓ **Couche limite atmosphérique stable (CLS)**

L'état stable de la CLA est induit lorsque le sol est plus froid que l'air. Ce phénomène d'inversion thermique au voisinage du sol peut être provoqué par le passage d'une masse d'air au-dessus d'un sol plus froid, ou encore par un taux de refroidissement du sol plus rapide que celui de l'air ambiant. Ces deux cas se présentent essentiellement durant la période d'hiver ou encore pendant la nuit, surtout lorsque l'absence de nuages favorise la perte de chaleur au sol par rayonnement.

Les forces de flottabilités vont alors s'opposer à toute élévation des masses d'air ; les plus chaudes se trouvant au-dessus des plus froides. De ce fait, les effets thermiques vont contrer le développement des fluctuations turbulentes verticales engendrées par les contraintes de cisaillement du vent. La CLA sera alors dans un état thermiquement stable conduisant à une turbulence relativement peu développée.

La couche limite atmosphérique stable (CLS) est constituée de deux parties :

- ✓ La couche stable, de l'ordre de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres (son épaisseur et son degré de stabilité thermique augmentent au cours de la nuit),
- ✓ La couche résiduelle, comprise entre la couche limite stable et l'atmosphère libre correspondant en fait à ce qui subsiste de la couche de mélange diurne après le coucher du soleil. Elle est caractérisée par un gradient de température potentielle pratiquement nul, caractéristique d'une atmosphère neutre. La turbulence interne tend à devenir isotrope et à se rapprocher d'une situation neutre. Elle est indépendante des effets du sol et n'est entretenue que par les contraintes de cisaillement induites par le vent.
- ✓ **Couche limite convective ou instable (CLC)**

La couche limite atmosphérique est dite instable lorsque $(\delta\theta/\delta t) < 0$. Elle est caractérisée par une turbulence importante favorisant le transport vertical. La CLC est constituée de trois parties :

- la couche de surface, de l'ordre de 100m de haut, représente alors 5 à 10% de la CLA,
- la couche de mélange, de l'ordre du kilomètre, représente quant à elle 35 à 80%, et la zone d'entraînement (ou d'inversion) de l'ordre de 10 à 40% de l'épaisseur totale de la CLA,

Au voisinage du sol, la température potentielle est décroissante et il y a production thermique de turbulence (échange turbulent de chaleur du sol vers l'air). Au-dessus de la couche de mélange (ou convective), une très forte turbulence règne et contribue à homogénéiser les grandeurs (profils verticaux de température potentielle et de vent quasiment constants) (fig.23).

A la limite supérieure, une couche d'entraînement (ou d'inversion) stabilise la CLA, en présentant une inversion de température. Cet état se rencontre fréquemment en journée, du fait du réchauffement du sol par absorption des radiations solaires.

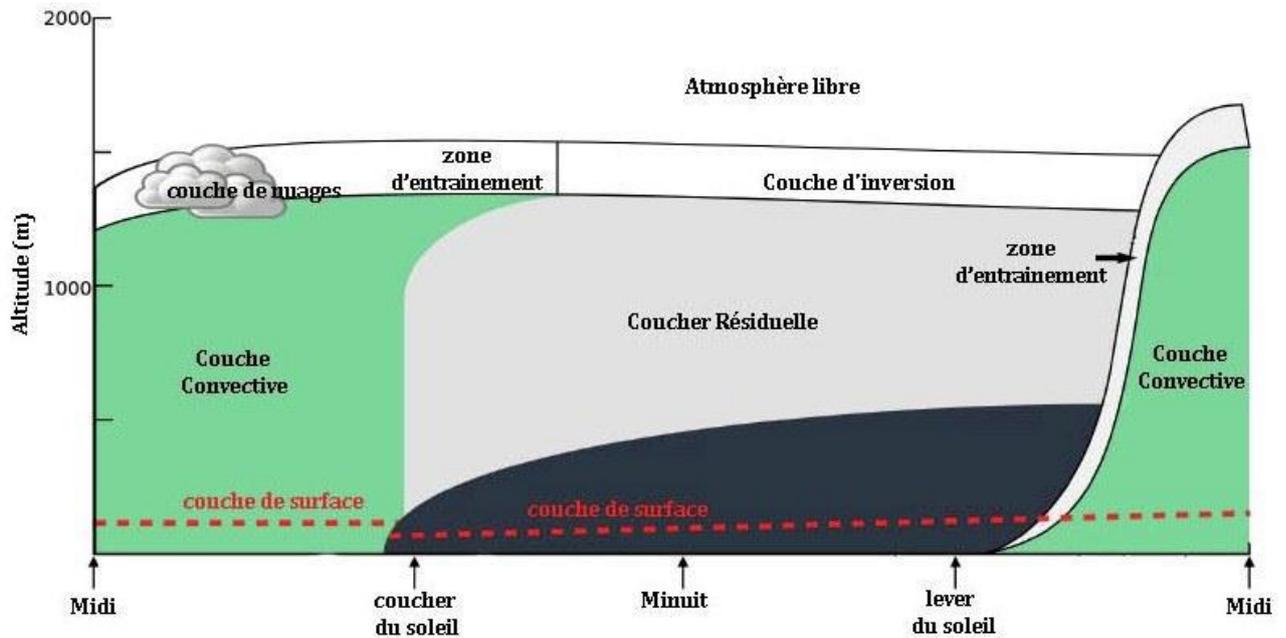


Figure 22 : Evolution typique de la stabilité de la CLA au cours d'une journée [35].

2.2.1.2. Les paramètres requis par AERMET :

Pour son fonctionnement le préprocesseur AERMET a besoin de données suivantes :

- Albédo,
- Rapport de Bowen (B_o) ,
- La hauteur de rugosité de surface (z_o en m),
- La hauteur de déplacement (d),
- La température ($^{\circ}\text{C}$),
- La vitesse du vent (u en m/s),
- La direction du vent (en degré par rapport au nord ; 0° - 360°),
- La couverture nuageuse (nébulosité).

2.2.1.3. Les sorties d'AERMET :

Le préprocesseur AERMET calcule les paramètres suivants, pour chaque heure:

- La longueur de Monin-Obukhov (LMO en m),
- La vitesse à la surface de frottement (u^* en m/s),
- Le flux de chaleur sensible de la surface (H en W/m^2) ,
- La vitesse de la mise en échelle par convection (w^* en m/s),
- La hauteur de la couche de mélange convective (z_{ic} en m),
- La hauteur de la couche de mélange mécanique (z_{im} en m),
- Les profils verticaux de la vitesse du vent,

- Température potentielle (θ en °C),
- Le gradient de la température potentielle ($d\theta/dz$ en °C/m),
- Ecarte-type de fluctuation de la vitesse verticale (σ_w en m/s),
- Ecarte-type de fluctuation de la direction du vent, (σ_θ en degrés).

2.2.1.4. Définitions des variables :

Dans cette partie nous allons s'intéresser à la signification physique des variables cités ci-dessus:

- **Albédo** : est le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface à l'énergie solaire incidente.
- **Le flux de la chaleur sensible** : est la chaleur qui entraîne une modification de la température correspondant au transfert de chaleur par convection entre la surface terrestre et l'air.

AERMET définit la stabilité de la CLA par la signe de H : convective pour $H > 0$ et stable pour $H < 0$.

- **Rapport de Bowen ($B_o = H/L$)** : est le ratio des flux d'énergies entre deux milieux transporté sous forme de chaleur sensible (H) et latente (L). Il est notamment utilisé pour caractériser les échanges dans la couche limite atmosphérique entre les surfaces continentales ou océaniques et l'atmosphère,
- **La hauteur de rugosité de surface** : est la hauteur au-dessus du sol z_0 du plan où s'applique la condition d'adhérence, c'est-à-dire où le vecteur vent moyen est égal au vecteur nul. Elle dépend, pour chaque direction, de l'homogénéité du terrain, du type d'obstacles et de la distance sur laquelle ces deux conditions s'appliquent. Il peut y avoir des variations significatives de la longueur de rugosité selon les saisons, dues par exemple aux feuilles ou à une couverture neigeuse
- **La hauteur de déplacement** : La hauteur de déplacement d'une surface rugueuse est la hauteur de laquelle le profil logarithmique des vitesses du vent est translaté vers le haut, à cause de la présence des éléments rugueux à sa surface,
- **La couverture nuageuse (nébulosité)** : est la fraction de ciel couverte par des nuages à un moment donné et sur une station déterminée,
- **Hauteur de mélange** : La hauteur de mélange correspond à l'épaisseur de la couche atmosphérique près du sol dans laquelle les polluants peuvent se disperser en quelques heures. Deux principaux mécanismes permettent aux polluants de se disperser rapidement dans la verticale : la turbulence thermique et la turbulence mécanique.

La turbulence thermique se produit lorsque l'air est moins dense près du sol, par exemple durant une journée ensoleillée et chaude.

La turbulence mécanique est causée par la variation verticale du vent et elle augmente lorsque les vents sont forts et que la surface du sol est rugueuse. La hauteur de mélange de la CLC dépend de deux hauteurs de mélange (mécanique et convectif), et elle est égale à la plus grande des deux. Pour CLS, elle est égale à la hauteur de mélange mécanique,

- **Vitesse de frottement** : représente les caractéristiques de vitesse des tourbillons induits par voies mécaniques près de la surface. Cette vitesse est de l'ordre de 10% de la vitesse du vent,
- **Température potentielle θ** : représente la température caractéristique des tourbillons induits par le cisaillement.

$$\theta \equiv T_o = T \times \left(\frac{1000}{P} \right)^{R/C_p}$$

- **Longueur de Monin-Obukhov (LMO)**: est définie comme le rapport de deux types de turbulence, l'une d'origine dynamique (due à la friction du vent) et l'autre d'origine thermique. Les mouvements turbulents sont causés par le réchauffement de la surface. Physiquement, la LMO peut être interprétée comme une hauteur [37].

$$L_{OM} = \frac{-\rho c_p T_a u_*^3}{g k H}$$

Où u^* est la vitesse de frottement à la surface de la Terre, k est la constante de Von Karman, g est l'accélération due à la gravité, H est le flux de chaleur sensible à la surface, et C_p sont respectivement la densité et la capacité calorifique de l'air et T_0 est la température de l'air à la surface.

En conditions instables ou convectives, LMO est négative. Sa valeur est la hauteur au-dessus de laquelle la turbulence convective (ou thermique).

En conditions stables, LMO est positive. Il s'agit alors de la hauteur au-dessus de laquelle le mouvement de turbulence verticale est inhibé par la stabilité de la stratification thermique :

- **Vitesse de la mise en échelle par convection (w^*)** représente les vitesses verticales dans les courants thermiques importants. Elle dépend de l'ampleur de l'énergie cinétique turbulente et de la mise à l'échelle de la hauteur pour les tourbillons z_i [37].

$$w_* = \left(\frac{g z_i H}{c_p \rho \theta} \right)^{1/3}$$

w* est de l'ordre de 1 à 2 m/s

2.2.1.5. Manipulation du préprocesseur AERMET :

- **Les fichiers d'entrée :**

Pour son fonctionnement le préprocesseur AERMET a besoin de deux fichiers ; un fichier d'entrée et un fichier de contrôle.

- **Fichier d'entrée d'AERMET :**

Le fichier d'entrée AERMET (cf. Annexe1) contient les données météorologiques de chaque heure de l'année de l'étude :

- **YEAR** : est l'année
- **MONTH** : est le mois (12 mois)
- **DAY** : est le jour (365 ou 366 jours)
- **HOURL** : est l'heure (8760 heures)
- **Dir** : est la direction du vent en degrés (0°-360°)
- **Speed** : est la vitesse du vent
- **T (°C)** : est la température en °C
- **CC** : la couverture nuageuse (Nébulosité) (1-8)

- **Le fichier de contrôle AERMET :**

Le fichier de contrôle contient des informations sur le fichier d'entrée AERMET. Les données à introduire dans le fichier de contrôle (cf. Annexe 2) sont les suivants :

- Le fichier d'entrée, "Input_Data_File_Name.txt", qui contient les données météorologique.
- Le fichier de surface AERMET de sortie, "Surface_File_Name.sfc",
- Le fichier de profil AERMET de sortie, "Profile_File_Name.pfl",
- **z₀** : la rugosité en m
- **dh** : hauteur de déplacement
- **Albédo** : albédo de la surface
- **Href** : hauteur à laquelle la température et la vitesse du vent sont mesurées
- **lat.** : latitude en degrés
- **tshift** : heures à l'avance (+) ou derrière (-) GMT

- vitesse minimale du vent (m/s),
- Flux thermique minimal (W/m²),
- Hauteur minimale de la couche de mélange
- 12 valeurs du rapport de Bowen pour chaque mois de l'année
- Gradient de température potentiel au-dessus de la hauteur de la couche de mélange °C/m

L'en-tête qui contient les informations suivantes :

- Coordonnées de station météorologique de surface
- Numéro d'identification de la station de surface
- Numéro d'identification de la station aérologique
- Le siècle de l'année spécifiée dans les données

Interrupteur="Y" si les données sont résolues à intervalles de 1 heure

– **Fichiers de sortie AERMET**

Lors de son l'exécution de préprocesseur AERMET génère deux fichiers : Un fichier de profil (.pfl) et un autre fichier de surface (.sfc).

• **Fichier de profil AERMET de sortie :**

Le fichier de profil AERMET (cf. Annexe 3) généré par le préprocesseur AERMET contient les données suivantes :

- Année
- Mois (1 - 12)
- Jour (1 -31)
- Heure (1 - 24)
- Hauteur de mesure (m)
- Top flag = 1, si c'est la dernière (la plus élevée) niveau pour cette heure, 0, si autre chose
- Direction du vent pour le niveau actuel (en°)
- Vitesse du vent pour le niveau actuel (m/s)
- Température pour le niveau actuel (°C)
- Ecarte-type de fluctuation de la vitesse verticale, σ_w , (en m/s)
- Ecarte-type de fluctuation de la direction du vent, σ_θ , (en degrés).

• **Fichier de surface AERMET de sortie :**

Le fichier de surface généré par le préprocesseur AERMET (cf. Annexe 4) contient les informations suivantes:

- Année
- Mois (1 - 12)
- Jour du mois (1 -31)

- Jour de l'année (1 – 366/365)
- Heure (1 - 24)
- Flux de chaleur sensible H (W/m)
- Vitesse de friction de surface, u^* (m/s)
- La vitesse de la mise en échelle par convection, w^* (m/s)
- Le gradient de la température potentielle $d\theta/dz$ (en °C/m) à 500 m au-dessus de la couche limite planétaire
- La hauteur de la couche de mélange convective : z_{ic} (en m)
- La hauteur de la couche de mélange mécanique : z_{im} (en m)
- Longueur de Monin-Obukhov, L (m)
- Rugosité de surface, z_0 (m)
- Rapport de Bowen, B_o
- Albédo, $r(N)$
- Vitesse du vent (m/s) utilisée pour l'estimation des paramètres de la couche limite
- Direction du vent (°), qui correspond à la vitesse du vent
- Hauteur à laquelle le vent a été mesuré (m)
- Température (K) utilisée dans l'estimation des paramètres de la couche limite
- Hauteur à laquelle la température a été mesurée (m)
- Code de précipitations (0-45)
- Précipitation (mm)
- Humidité relative (%)
- Pression de surface (mb)
- Couverture nuageuse (dixièmes).

2.2.2. Préprocesseur AERMAP :

AERMAP est un préprocesseur du terrain utilisant les données du terrain maillé pour calculer une hauteur d'influence h_c (appelée aussi l'échelle de hauteur du terrain) représentative du terrain.

Cette hauteur est définie de manière unique pour chaque emplacement récepteur, elle est utilisée pour calculer la hauteur de séparation aérodynamique H_c .

Les données maillées requises par AERMAP sont sélectionnées à partir des données du modèle numérique d'élévation (DEM).

AERMAP est aussi utilisé pour créer des grilles de récepteurs. L'élévation de chaque récepteur est spécifique, et est attribué automatiquement par le biais d'AERMAP.

Pour chaque récepteur, AERMAP transmet les informations suivantes à AERMOD :

- Emplacement de récepteur,
- Sa hauteur au-dessus du niveau de mer,
- L'échelle de hauteur du terrain spécifique au récepteur.

2.2.3. Préprocesseur BPIPPRM :

BPIPPRM est utilisé afin d'incorporer l'effet des bâtiments dans le modèle AERMOD. Les données d'entrées dans ce préprocesseur incluent les coordonnées et hauteurs des bâtiments et cheminées.

Le programme BPIPPRM est généralement exécuté pour évaluer l'effet des bâtiments sur la dispersion des polluants. Les bâtiments peuvent forcer les contaminants vers le sol prématurément sous certaines conditions météorologiques.

Les sorties de BPIPPRM sont utilisées dans le module PRIME d'AERMOD afin d'estimer avec précision les effets de sillage (turbulence) et de cavités provoquées par la présence de bâtiments. Cette option est particulièrement importante dans le cas où des édifices susceptibles de modifier l'écoulement de l'air se trouvent à proximité des sources d'émissions ponctuelles (ex. : cheminée). Les résultats du calcul du module PRIME sont par la suite incorporés au modèle AERMOD qui applique les corrections requises pour l'estimation des concentrations dans l'air ambiant.

2.3. Le modèle AERMOD :

AERMOD est un modèle à panache gaussien stationnaire de dernière génération basé sur la structure turbulente de la couche limite planétaire et des concepts d'échelles, incluant les terrains plats et complexes. Il détermine la vitesse du vent et la classe de stabilité qui donnent lieu aux concentrations maximales. Ce type de modèle permet de prédire des concentrations dans l'air ambiant de rejets des polluants gazeux et de particules solides à des récepteurs placés au niveau de sol [7].

2.3.1. Caractéristiques du modèle AERMOD :

Le modèle AERMOD est conçu pour s'adapter à diverses situations de modélisation. La flexibilité du modèle permet de tenir compte de différentes caractéristiques associées au contexte local. Les principales caractéristiques du modèle AERMOD sont les suivantes :

- ✓ Divers catégories de sources d'émission (sources ponctuelles, linéaires ou de surface, etc.),

- ✓ Les taux d'émission constants ou variables pour une source unique, multiple ou combinaison des sources,
- ✓ Calcul de l'ascension des panaches due à la quantité de mouvement et à la flottabilité des rejets en fonction de la distance de la source,
- ✓ Rabattement du panache par la cheminée,
- ✓ Calcul de la dispersion en fonction de l'utilisation du sol (milieu urbain ou rurale),
- ✓ Prise en compte des phénomènes de dépôt sec et humide pour les particules,
- ✓ Intégration de la pollution de fond issue des observations sur le terrain dans les calculs,
- ✓ Création de profils de température, de vent et de turbulence afin de déterminer une hauteur de mélange mécanique et convective,
- ✓ Intégration de caractéristiques de surface du terrain telles que la hauteur de rugosité, l'albédo et le ratio de Bowen,
- ✓ Grille de points-calcul (récepteurs) flexible;
- ✓ Incorporation de termes d'ajustement permettant de tenir compte des propriétés physicochimiques pouvant affecter le comportement de certains composés.

2.3.2. Données d'entrée fournie au modèle AERMOD :

Les principales données d'entrée à fournir au modèle sont les suivantes :

- ✓ Les données météorologiques horaires de surface et les données de radiosondage.
- ✓ Les données d'émissions, intégrant la localisation des sources, leur géométrie
- ✓ Les données topographiques relatives au domaine d'étude : relief, occupation des sols et détail du bâti
- ✓ Les données sur la pollution de fond
- ✓ Domaine de modélisation et grille de calculs;

2.3.3. Données de sortie générée par le modèle AERMOD :

Les principales données de sortie à fournir au modèle sont les suivantes:

- ✓ Les concentrations moyennes à court terme des polluants au niveau du sol (concentrations horaire ou journalière).
- ✓ Des données statistique à long terme (moyennes annuelle, les valeurs maximales...).
- ✓ Dépôts secs, humides et totales des polluants.

2.3.4. Calcul des concentrations :

Le modèle calcule les concentrations de contaminants dans l'air ambiant en provenance de chaque source ou groupe de sources pour toutes les heures de données météorologiques fournies.

La concentration horaire d'un contaminant à un récepteur est alors obtenue par addition des contributions de chacune des sources. Le modèle détermine les concentrations moyennes sur de plus longues périodes (ex. : 8 heures, 24 heures ou 1 an) en effectuant la moyenne arithmétique des concentrations horaires calculées sur la période.

2.3.5. Manipulation du modèle AERMOD :

Pour manipuler le modèle, le modélisateur doit saisir un code dans un document d'extension « .inp » appelé fichier d'entrée (cf. Annexe 5). Ce code est scindé en 5 chemins, chaque chemin contient un grand nombre de commandes qui peuvent être obligatoire ou optionnelles, répétitives ou non répétitives.

2.3.6. Principaux chemins et commandes :

Cette partie est destinée à la définition des chemins et les commandes qui leur sont attribuées.

Tableau 6 : Les chemins et leurs définitions

CO	le chemin de contrôle (CO ntrôle), permet de préciser les options générales de contrôle de la fonction
SO	le chemin de source (SO urce), sert à préciser les informations relatives aux sources
ME	le chemin de météorologie (ME eteorology), sert à préciser les données météorologiques
RE	le chemin de récepteur (RE cepteur), sert à préciser les informations relatives aux récepteurs
EV	le chemin d'évènement (EV ent), facilite l'analyse de la contribution des sources à des événements spécifiques pour les moyennes à court terme (inférieur ou égal à 24 heures).
OU	chemin de sortie (OU tput), définit les options de sortie.

- **Les commandes :**

Le fichier d'entrée AERMOD.INP nécessite le suivi d'un certain nombre de commandes importantes (cf. Annexe 6).

2.3.7. Exécution du modèle :

Afin d'exécuter le modèle, l'utilisateur doit placer le fichier exécutable AERMOD et les fichiers d'entrée dans un même dossier et démarrer le programme par double clic sur le fichier exécutable.

- Le fichier d'entrée d'AERMOD : (appelé AERMOD.INP) contient les options définies par l'utilisateur pour exécuter le modèle, il comprend les informations de données des paramètres de la source et du groupe de la source, définit les emplacements des récepteurs, spécifie l'emplacement et les paramètres concernant les données météorologiques, et précise les options de sortie,
- Les fichiers météorologiques : les deux fichiers de surface et de profil générés par AERME,
- Le fichier aermap.out permet de prendre en considération la topographie du site.

Le fichier BPIP.OUT permet de prendre en compte la présence de bâtiments proches des sources pouvant influencer sur la dispersion atmosphérique.

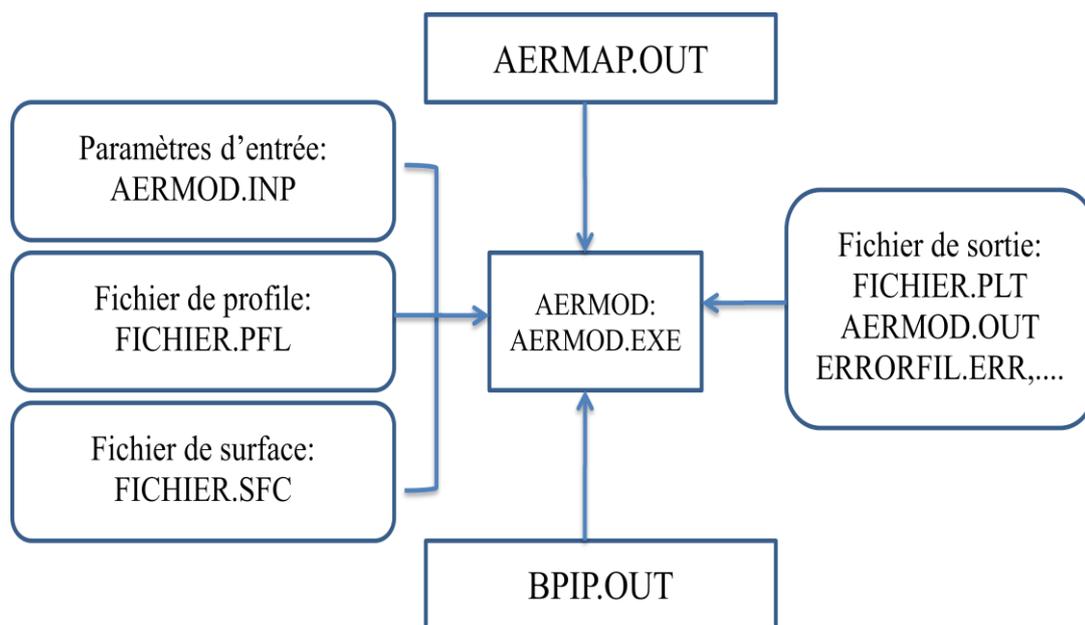


Figure 23 : Plan d'exécution du modèle

Le modèle AERMOD produit, selon les besoins de l'utilisateur, une variété de fichiers de sortie :

- ✓ Fichier «AERMOD .OUT » ; fichier de sortie principale du modèle qui contient les détails sur la simulation,

- ✓ Fichier «*****.PLT »; dans laquelle les maximums des concentrations pour chaque récepteur sont affichés, ce fichier est destiné au traçage des courbes d'iso-concentration (cf. Annexe 7),
- ✓ Fichier «*****.POS » ; permet d'afficher la totalité des concentrations prédite pour chaque récepteur,
- ✓ Fichier «ERRORFIL .ERR » ; permet d'afficher l'ensemble des erreurs rencontrées lors de l'exécution du programme,
- ✓ Fichier «INITFIL .INI » ; permet d'initialiser le modèle.

Chapitre 4

Cartographie des PM10 dans la RGC au cours de l'année 2014

Ce chapitre présentera les résultats des simulations effectuées à l'aide du modèle AERMOD pour l'année 2014. Ces simulations sont basées sur les données de cadastre d'émissions atmosphériques de la RGC et les données météorologiques issues de la station de Casa-Anfa.

L'étude consiste à couvrir le domaine d'étude par une grille de calcul, dans laquelle les concentrations sont simulées en chaque point, ensuite les résultats obtenus seront traités avec le logiciel SURFER 12 afin de produire des cartes de la dispersion atmosphérique de PM10.

1. Le domaine d'étude :

1.1. Topographie et occupation des sols :

1.1.1. Topographie :

Le relief n'a pas été pas été intégré dans le modèle, étant donné que le domaine d'étude est relativement plat. Il est compris entre 0 et 300 m (fig.24).

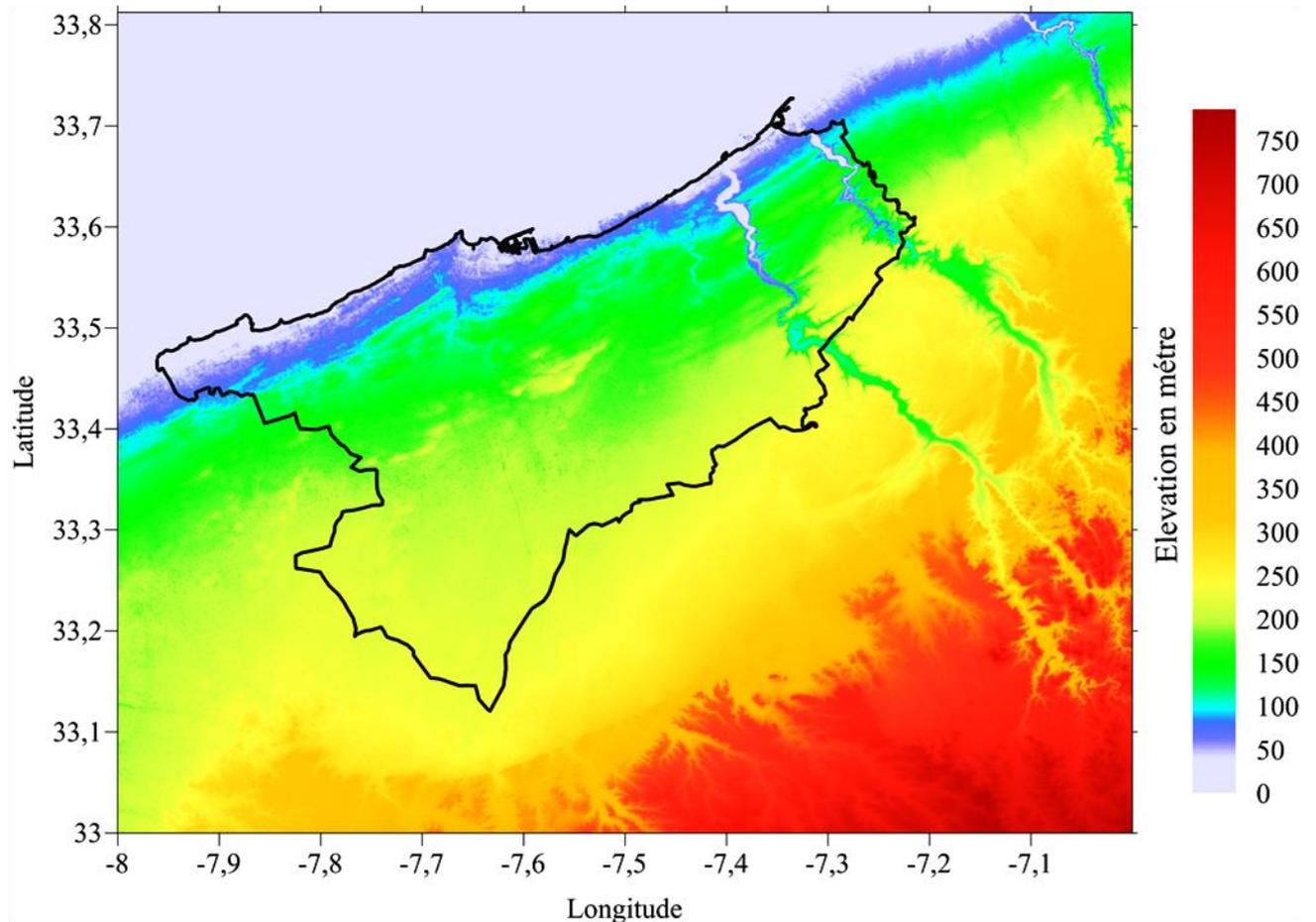


Figure 24 : Topographie du domaine d'étude

1.1.2. Occupation des soles :

La nature des sols peut influencer la progression du panache de pollution grâce à un paramètre de rugosité. Ce paramètre est utilisé dans les modèles de dispersion atmosphérique et qui représente la nature rugueuse des obstacles occupant le sol. Il a la dimension d'une longueur variant entre 3 et 10 mètres (surface désertique) et environ 1,5 mètre pour les sols urbains les plus denses.

Dans la totalité du domaine d'étude de la RGC l'occupation du sol est assimilée à une occupation urbaine de rugosité de 0.5 m.

1.2.La grille des récepteurs :

Le domaine d'étude retenu est un rectangle de 60 km est-ouest et 52 km nord sud, centré sur la RGC. Une grille de calcul composée de 6763 points récepteurs est utilisée sur ce domaine (fig.25). Les points de cette grille correspondent :

- Aux 7 stations de surveillance de la qualité de l'air de la RGC (7 points de calcul)
- A deux grilles :
 - une grille d'une résolution de 2 Km couvrant l'ensemble du domaine d'étude (451 points)
 - une grille centrée sur la RGC avec une résolution de 1 km (2223 points).
- aux points discrets près des axes routiers principaux (4082 points).

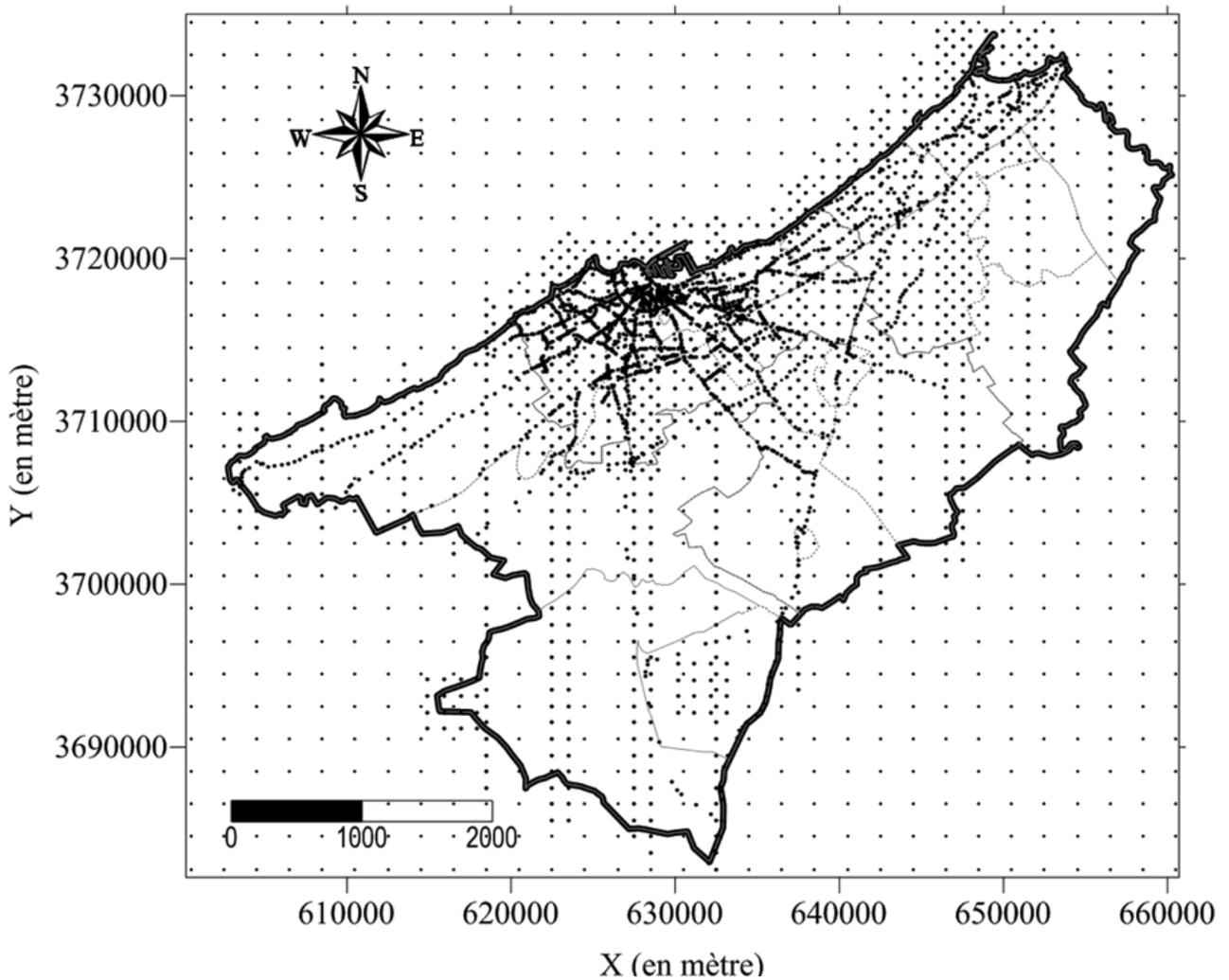


Figure 25 : Grille des récepteurs utilisés pour les calculs des concentrations

N.B : Le système géographique utilisé pour ces simulations est le système WGS 84 UTM ZONE 29N.

2. Sources modélisés dans AERMOD :

Les sources modélisés sont au nombre de 7261 sources distribuées sur quatre catégories de sources (tab.7).

Les principales sources industrielles sont modélisées sous forme des sources ponctuelles (GSP), le trafic routier principal sous forme linéaire (GSL), le trafic routier secondaire sous forme volumique (SVOL), les sources aéroportuaire sous forme ponctuelle et volumique et finalement les sources résidentielles et tertiaires sous forme volumique (fig.26).

Tableau 7 : Nombre et catégories de sources modélisées

Type de sources	GSP	GSL	SVOL
Nombre de sources modélisées	48	4082	3131

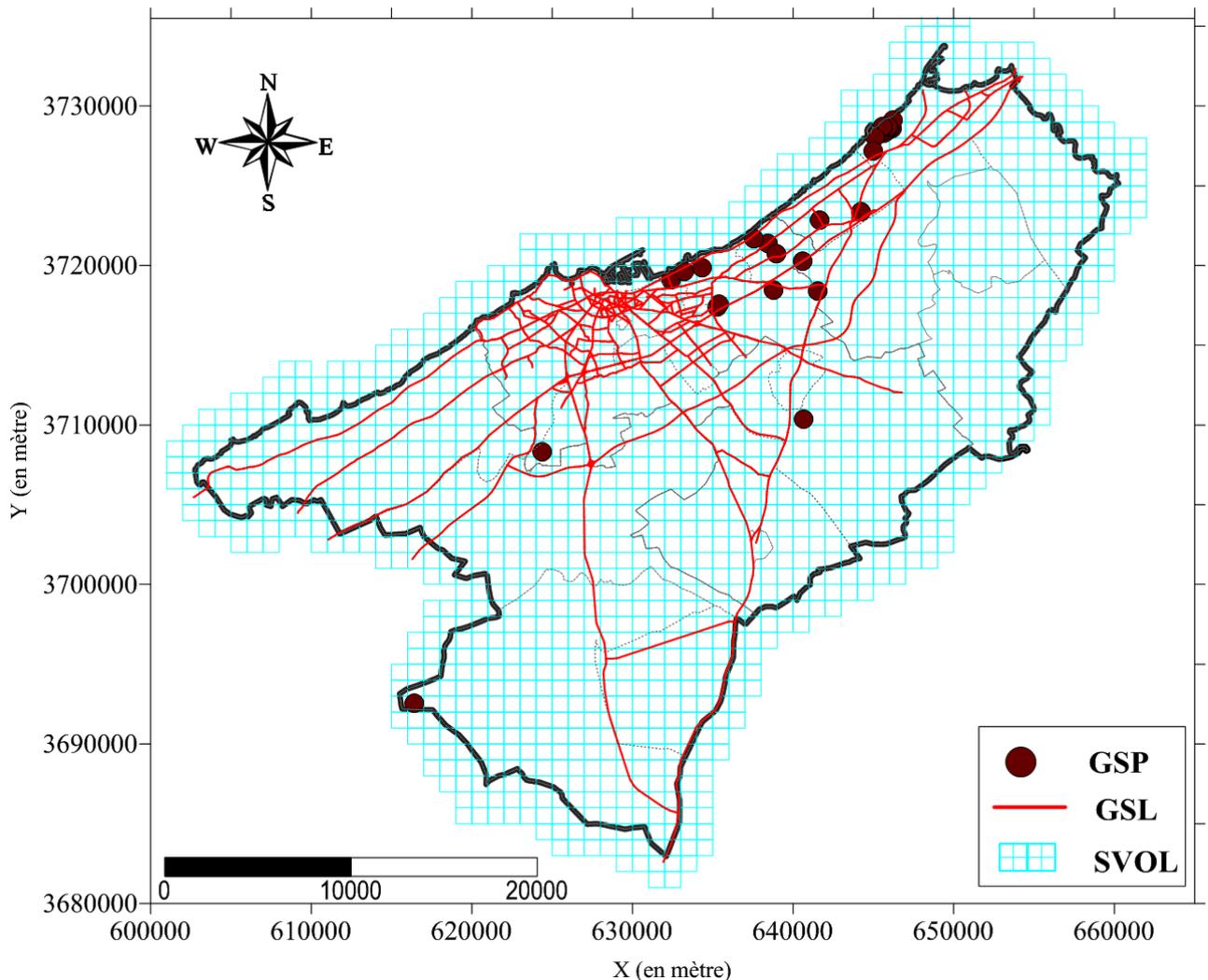


Figure 26 : Sources modélisées

3. Condition météorologique :

Les données mesurées pendant l'année 2014 à la station météorologique de Casa-Anfa pour l'utilisation du modèle AERMOD y sont mesurés sur une base horaire. Ces paramètres sont : la vitesse et la direction du vent, la température et la couverture nuageuse.

Pour l'année 2014, on constate que les vents dominants (fig.27) sont du nord-nord-est avec une fréquence de 17 % suivis, par les vents du nord (12 %), de l'ouest (11 %), sud-sud-ouest (11%) et du sud (10%). Les vents calmes (dont la vitesse est inférieure à 0,5 m/s) sont observés à une fréquence de 3.37 %.

L'allure générale de la rose des vents suggère donc que les régions qui subiront le plus fréquemment l'influence des émissions atmosphériques sont celles qui sont situées au sud-sud-ouest, au sud , à l'est, au nord-nord-est et au nord des sources d'émissions.

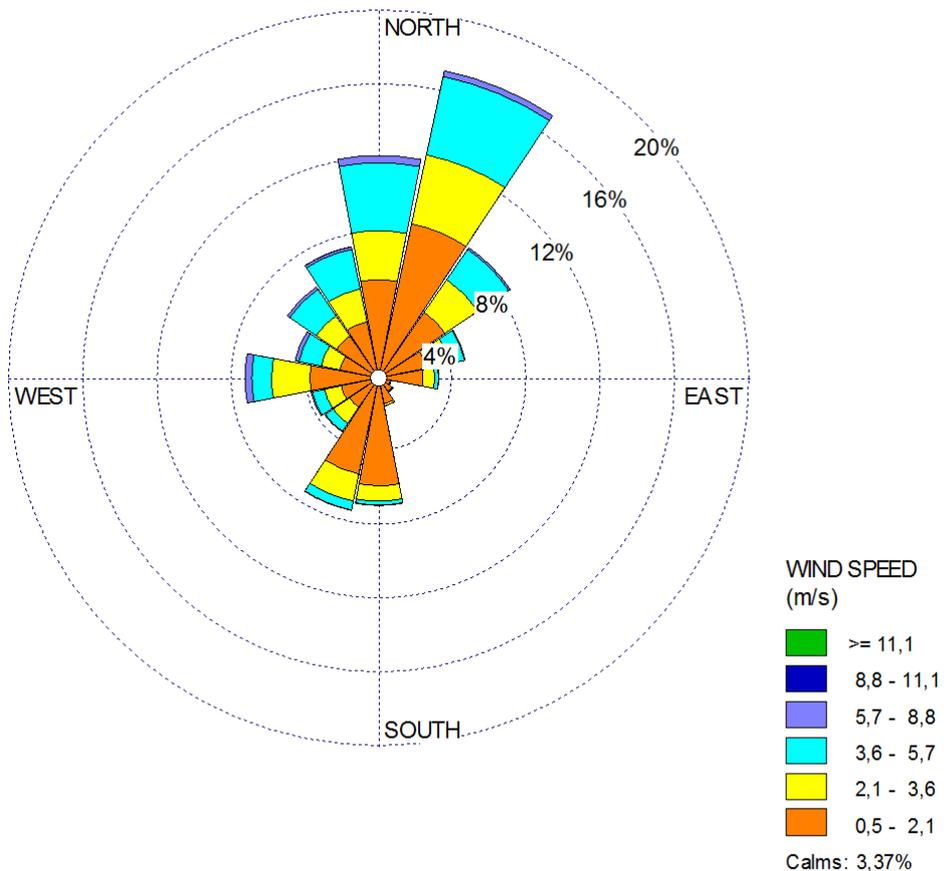


Figure 27 : Rose des vents de l'année 2014

4. Emissions de PM10 dans la RGC :

Les principales sources d'émissions des PM10 dans la RGC sont les installations de combustion, le trafic routier et certains procédés industriels (production de ciment, verre, céramique, brique, acier, détergeant, agroalimentaire, etc.).

Selon le dernier inventaire des émissions atmosphérique réalisé au niveau de la Région du Grand Casablanca les émissions de PM10 dans de cette région sont d'environ 6434 tonnes/an.

Le secteur industriel est le principal émetteur des PM10. Il contribue de 87% dans les émissions totales de la région (fig.28), suivit du secteur de transport routier avec une contribution de 13%. Et enfin les émissions aéroportuaires et des secteurs résidentiels et tertiaires qui ne dépassent pas 0.1%.

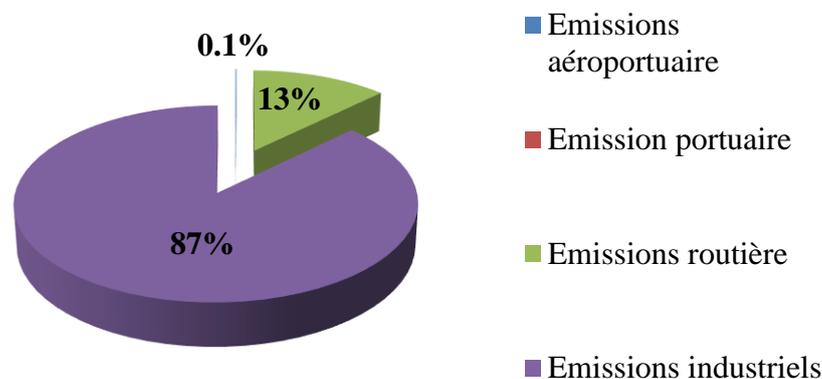


Figure 28 : Répartition des émissions des PM10 dans la RGC par source d'émissions

4.1. Emissions de PM10 par catégorie de sources :

4.1.1. Emissions de PM10 relative aux GSP :

Les grandes sources ponctuelles comprennent les grandes sources industrielles et la chaufferie de l'aéroport de Mohamed V. Elles contribuent de 87.3% (environ 5617 t/an) dans les émissions des PM10 dans la RGC (fig.29).

La cartographie des principales GSP modélisées (fig.30) selon leurs émissions en tonne par an montre que la cimenterie de Lafarge est la source la plus polluante avec un tonnage des émissions des PM10 dépassant 1300t/an.

■ GSP ■ GSL ■ SVOL ■ SSURL

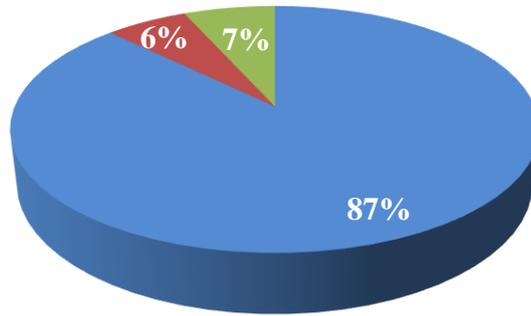


Figure 29 : Répartition des émissions des PM10 par catégorie de sources

On note aussi la contribution de la CTM (ONE) avec une émission de 405,13 t/an, SAMIR _UPG avec 104,61 t/an, et les FAM (Les Fonderies et Aciéries du Maroc) avec 300 t/an.

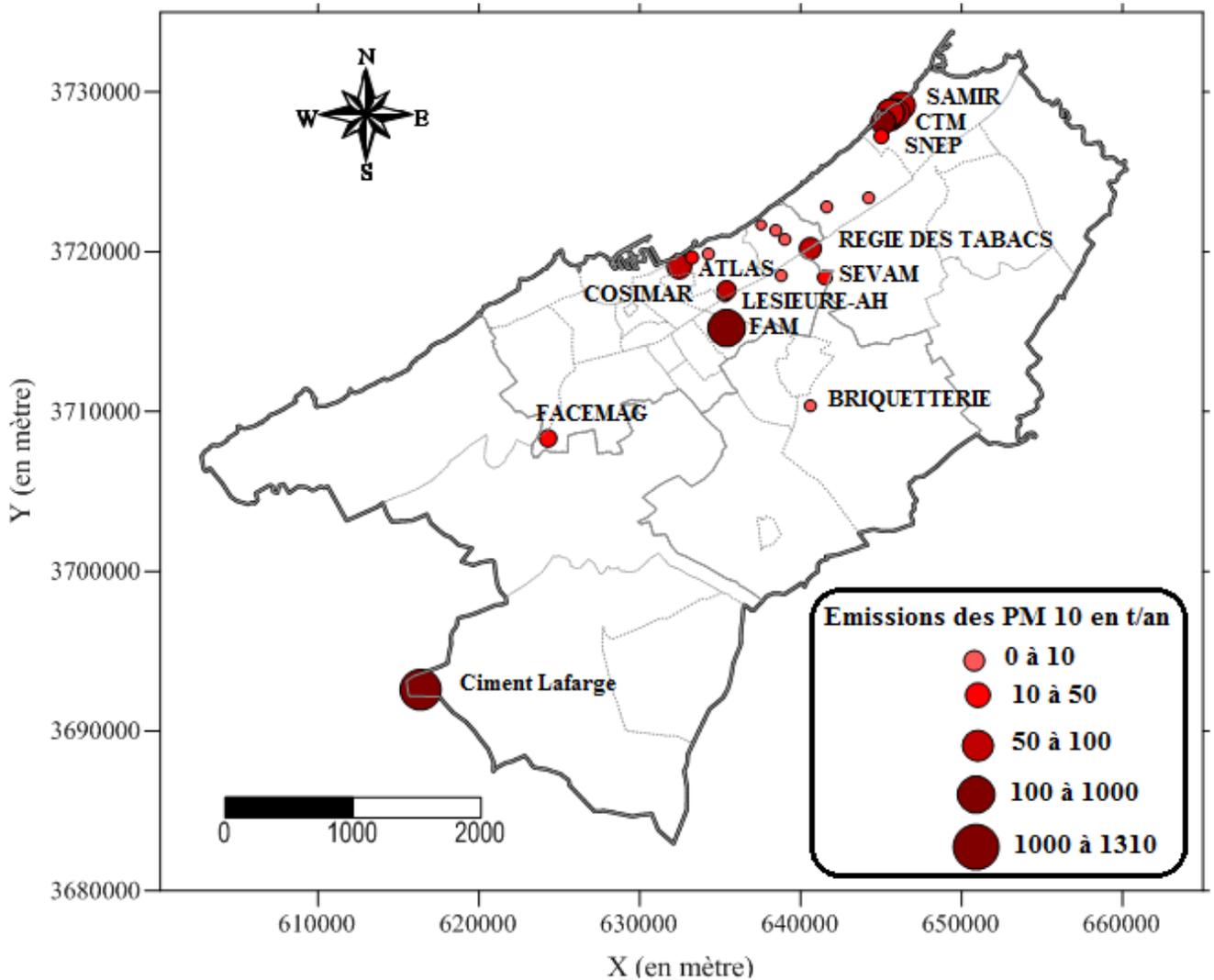


Figure 30 : Cartographie des émissions des PM10 relatives aux GSP

4.1.2. Grandes Sources Linéiques (GSL) :

Un certain nombre d'axes routiers de la RGC a été défini en tant que GSL comprenant les émissions du trafic routier principal. Ils sont responsables de l'émission de 6% des PM10 dans la RGC environ 386 t/an. Ces axes ont été définis en fonction de l'importance du trafic qui les caractérise. En tous 4082 brins ont été identifiés (fig.31).

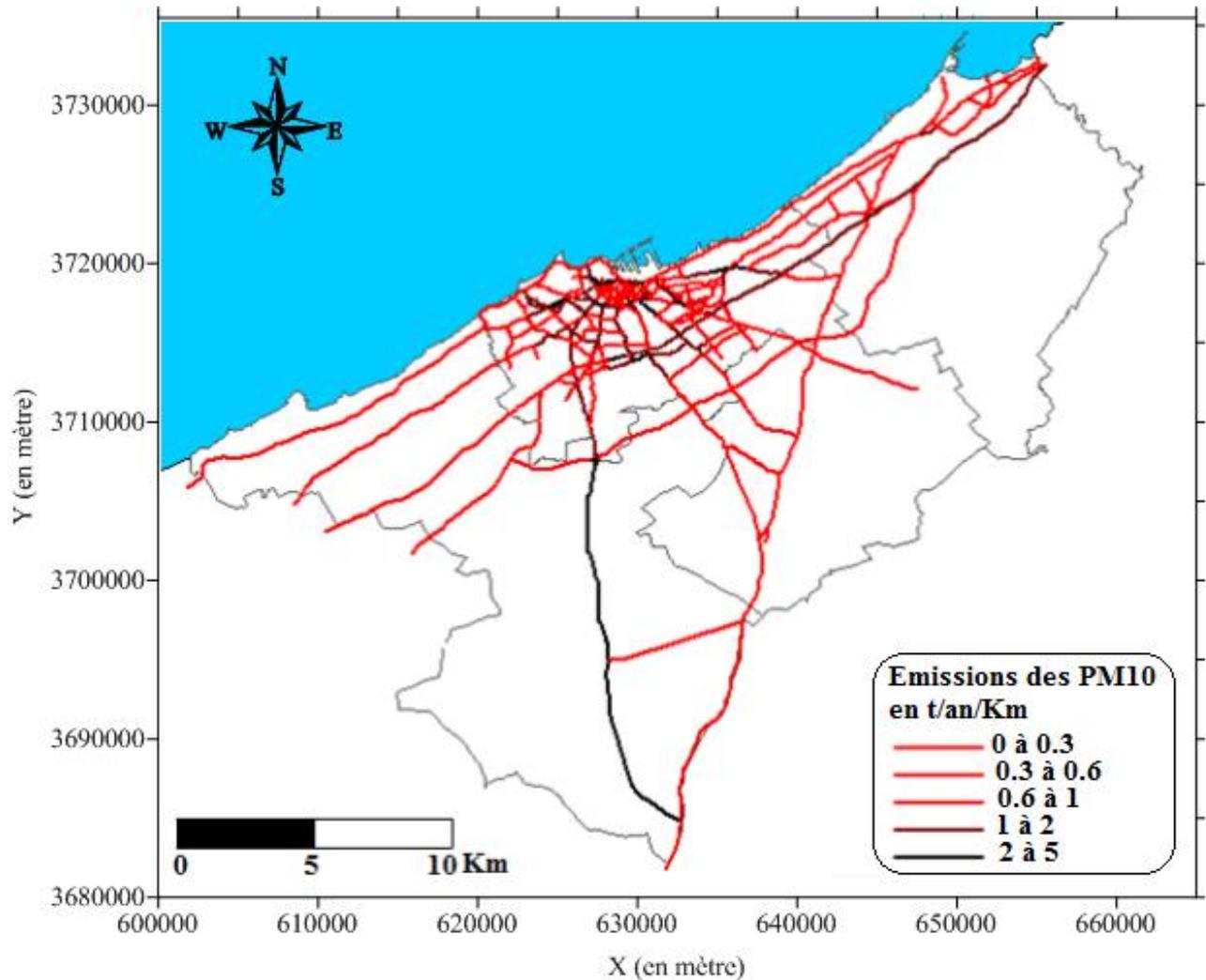


Figure 31 : Cartographie des émissions des PM10 relatives aux GSL

On remarque que les taux d'émissions des PM10 relatives aux GSL sont plus importants au niveau de la ville de Casablanca ainsi qu'au niveau des principaux axes routiers qui la relient aux autres villes avoisinantes.

Les lignes routières les plus émettrices de PM10 au niveau de la Région sont les suivantes : Route de Khouribga, Route d'El-Jadida, Route du sud, Autoroute casa-rabat, Bouvard Moulay Ismail, Avenue des FAR, Boulevard Abdelkrim El-Khattabi, Boulevard panoramique, Boulevard Moulay Youssef et Boulevard de bordeaux.

4.1.3. Sources volumiques (SVOL) :

Les SVOL sont responsables de l'émission de 7% des PM₁₀ (environ 430t/an) au niveau de la région du Grand Casablanca. Ces sources regroupent 3 types d'activités : le trafic routier secondaire (425 t/an), le trafic aérien et le résidentiel tertiaire (1.5t/an) (cf. Annexe 8).

Chacune de ces activités a été modélisée par 1565 sources volumiques de 1km x 1km de côté et d'une hauteur de 1 m pour le trafic routier et de 10 m pour le trafic aérien et le résidentiel tertiaire.

La cartographie de sources volumiques modélisées selon leurs taux d'émission totale en t/an, montre que les émissions de PM₁₀ relatives aux SVOL (fig.32) sont plus importantes au niveau des préfecture de Casablanca et Mohammedia. Toutefois ces taux d'émissions restent négligeables sur les périphériques ainsi que devant les émissions des GSP.

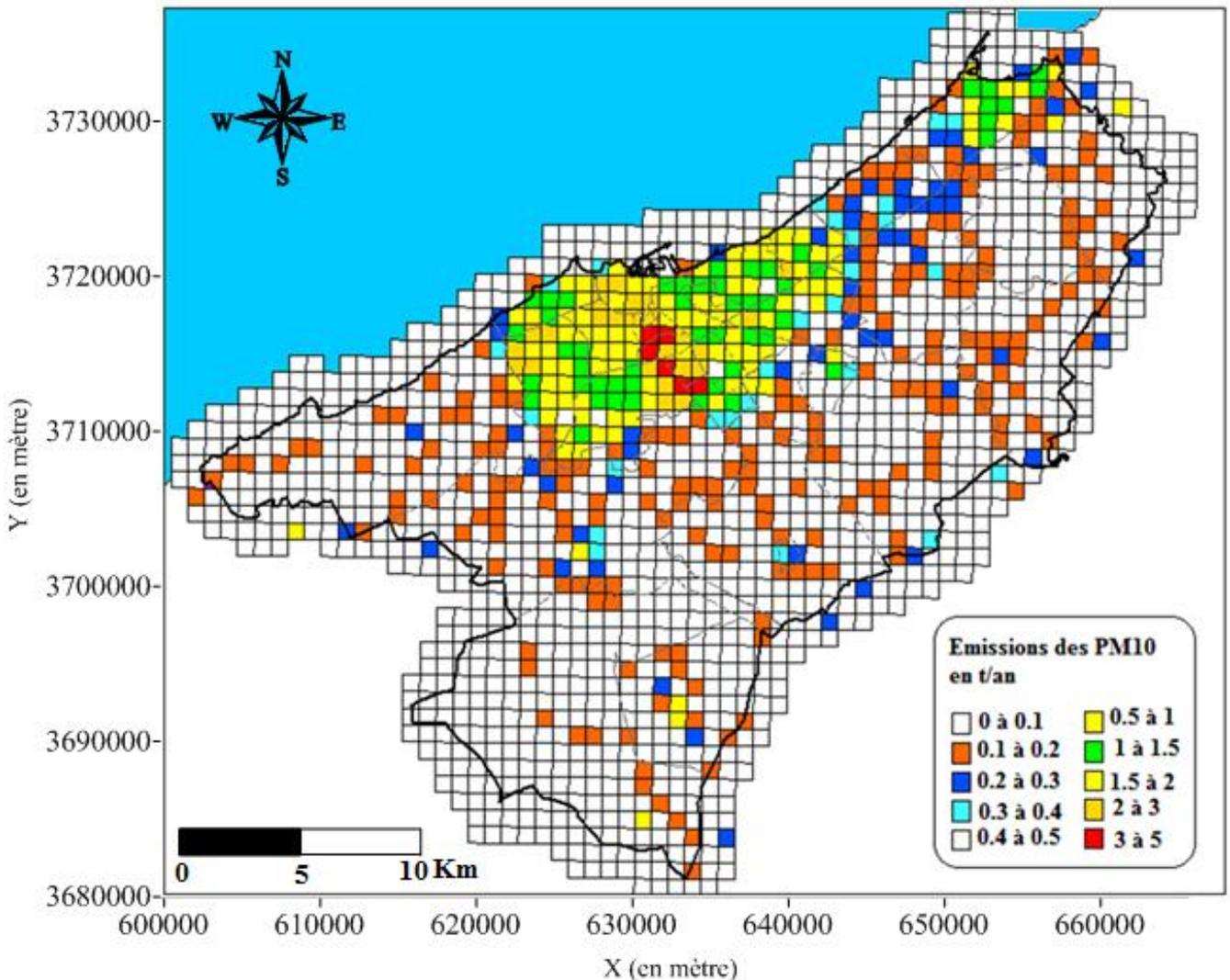


Figure 32 : Cartographie des émissions des SVOL

5. Simulation de dispersion des émissions de toutes les catégories de sources sur la RGC au cours de l'année 2014 :

5.1. La cartographie des concentrations journalières simulées pour 2014:

Les résultats de simulation de la dispersion des PM10 sous forme des concentrations moyennes horaires au niveau de toute la RGC (fig.33), reflètent clairement que les sources modélisées génèrent une pollution qui dépasse la norme pour certains récepteurs placés à proximité des GSL et des GSP.

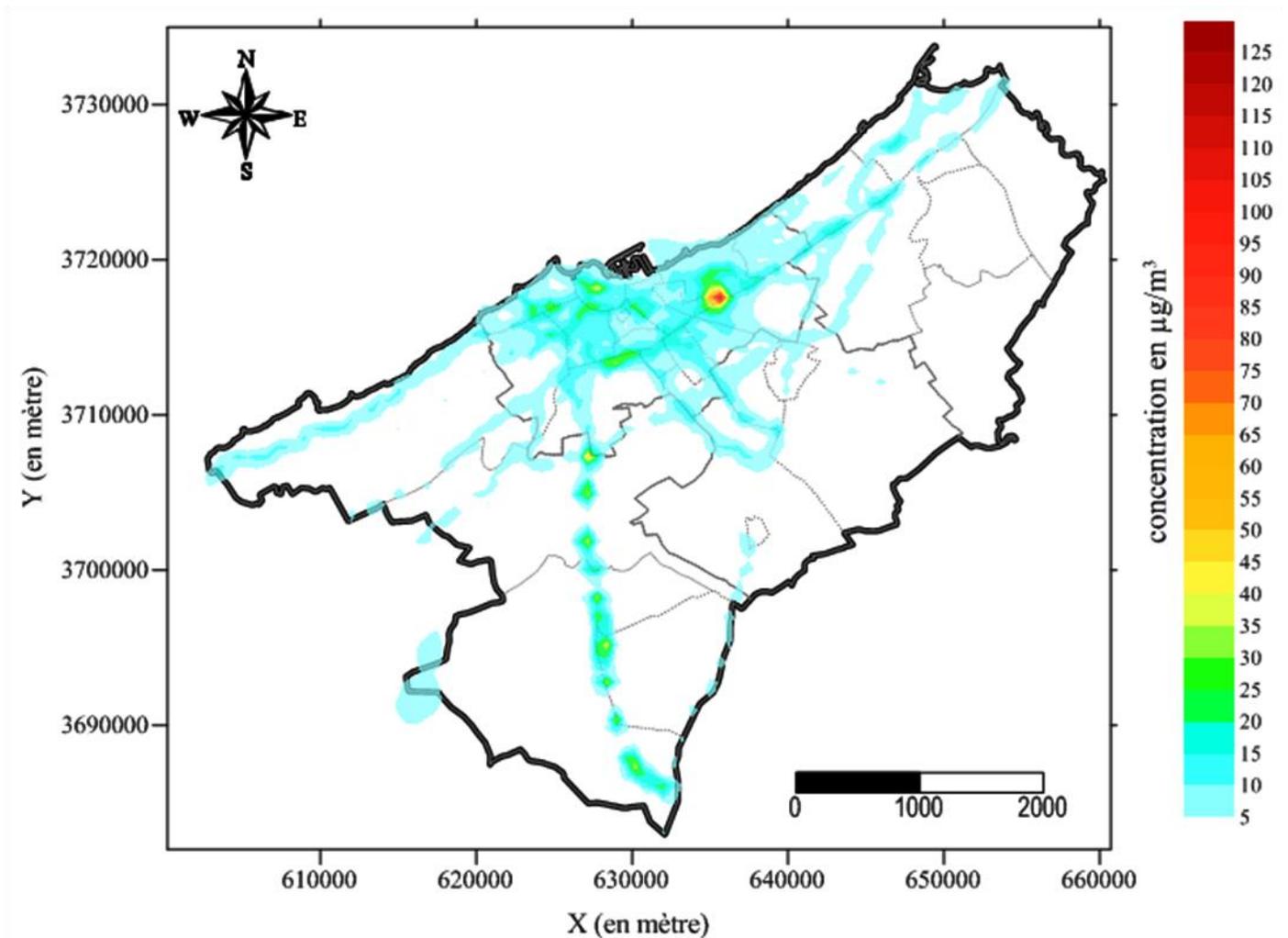


Figure 33 : Simulation de la dispersion des concentrations moyennes journalières

Les concentrations prédites dans la plupart des zones à proximité des grandes voies de circulation ainsi que des zones industrielles dépassent largement la valeur guide de l'OMS qui est estimée pour les concentrations moyennes horaires à $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les niveaux en PM10 loin de ces sources restent faibles et ils ne présentent pas de risque de dépassement de la valeur guide de l'OMS.

Cela permet ainsi d'identifier des zones critiques telles que la zone industrielle d'Ain Sebâa, Sidi Moumen, Hay Mohammadi et les zones à proximité de la Route de Khouribga au niveau desquelles on rencontre une forte pollution par les PM10.

5.2. La cartographie des concentrations annuelles simulées pour 2014 :

La cartographie des concentrations moyennes annuelles des PM10 sur la zone d'étude montre, comme pour la simulation précédente, que des plus fortes concentrations sont atteintes et dépassent les lignes directives de l'OMS pour les concentrations moyennes annuelles soit $20\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces fortes concentrations sont observées sur les axes routiers, au niveau du centre-ville de Casablanca, ainsi que sur les zones à proximité de la zone industrielle d'Ain Sebâa (fig.34).

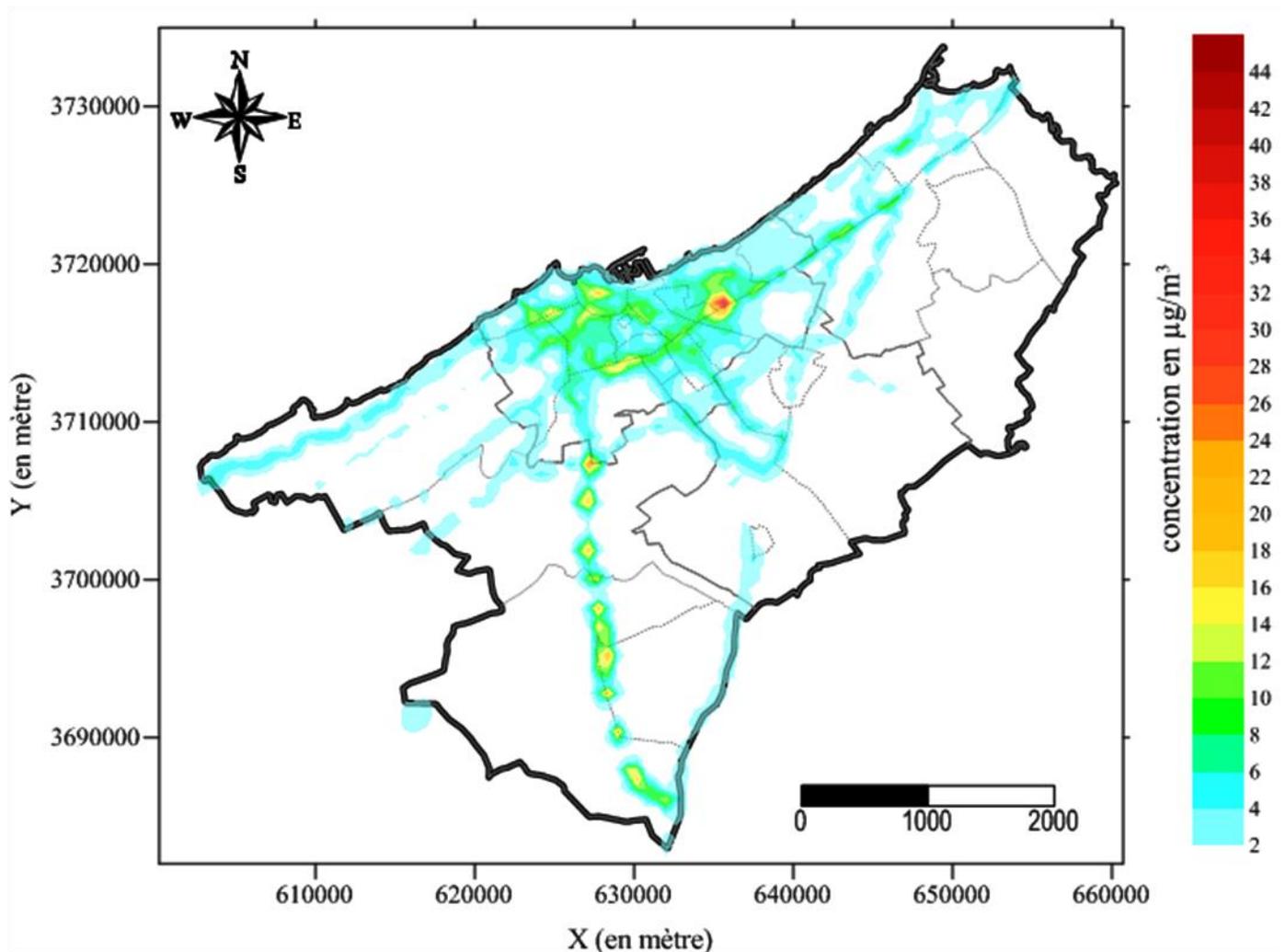


Figure 34 : Simulation de la dispersion des concentrations moyennes annuelles

5.3. Résultats et observations :

Les résultats de ces simulations (horaire (cf. annexe 9), journalière et annuelle) permettent de relever les remarques suivantes:

- ✓ Les dépassements des normes sont essentiellement provoqués par les GSL et les GSP,
- ✓ Les valeurs guides de l'OMS sont dépassées autour de quelques axes routiers modélisés et ponctuellement sur Aïn-Sbaâ,
- ✓ L'étalement des concentrations maximales observées pour les particules représente bien l'étalement urbain représentatif des émissions du secteur industriel et du transport,
- ✓ L'effet néfaste de la pollution peut être remarqué sur la population adjacente aux zones industrielles ainsi qu'aux axes routiers principaux,
- ✓ Les niveaux de pollution en PM10 estimés loin des sources d'émissions restent négligeables pour l'ensemble des simulations effectuées.

6. Evolution de la pollution par les PM10 entre 2010 et 2014 sur la RGC :

La cartographie de la pollution particulaire a montré que les valeurs limites n'ont pas été respectées pour les deux années (fig.34 et fig.35) dans la zone urbaine où le trafic est dense ainsi qu'au niveau de la zone industrielle d'Ain Sebâa.

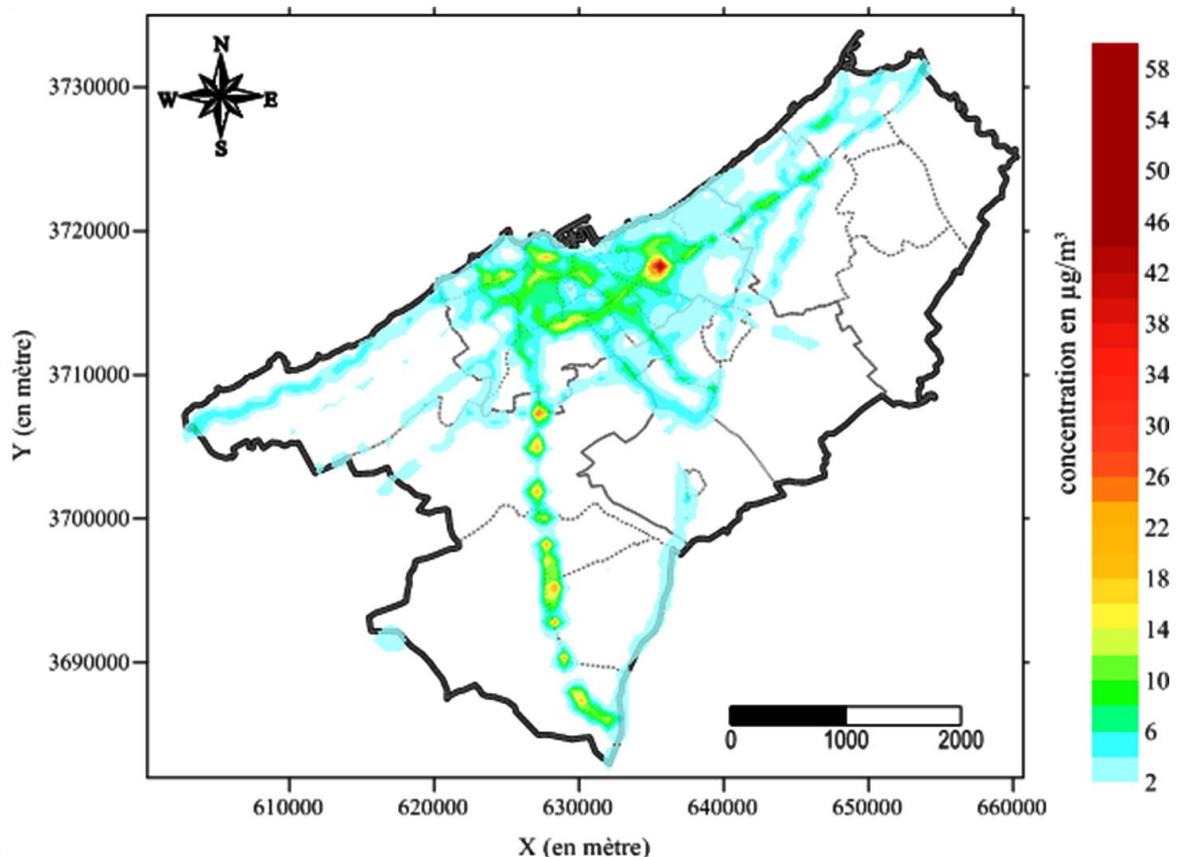


Figure 35 : Cartographie annuelle simulée pour les PM10 en 2010

On comparant la moyenne annuelle des PM10 sur la RGC entre 2014 et 2010 (tab.8) ; on remarque une petite amélioration de la qualité de l'air à Casablanca dans l'année 2014 par rapport à 2010.

Tableau 8 : la moyenne annuelle des PM10 en 2010 et 2014 dans la RGC

ANNEE	MOYENNE ANNUELLE EN $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2014	3.98
2010	4.05

Cette diminution des teneurs en PM10 dans l'air ambiant dans la RGC en 2014, par rapport aux teneurs prédites en 2010, peut être imputable à plusieurs facteurs dont l'évolution des conditions météorologiques qui peuvent effectivement engendrer des teneurs annuelles de pollution plus ou moins importantes. Ainsi que la contribution de la pollution de fond en PM10 intégrée dans AERMOD représente, en moyenne $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour 2014 et $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour 2010 avec une variabilité horaire issue des mesures effectuées par les stations de mesures. Les concentrations simulées sont donc fortement conditionnées par la pollution de fond intégrée au modèle.

Les valeurs mesurées par ces stations ne sont donc pas représentatives de l'ensemble du territoire de la région et leur utilisation en tant que pollution de fond conduit à une surestimation des valeurs en milieu rural. Inversement, l'intégration d'un niveau de fond rural entraîne une sous-estimation des valeurs de PM10 dans la zone urbanisée au nord de la région.

Chapitre 5

Comparaison modèle/station

Ce chapitre a pour but de présenter les résultats de la modélisation au niveau des points particuliers du domaine d'étude. Ces points correspondants aux stations du réseau fixe de mesures, sont comparés aux valeurs modélisées afin de quantifier l'incertitude liée à la modélisation.

En premier lieu on s'intéressera à l'évaluation de la pollution particulaire au niveau de la RGC en se basant sur les données des différentes stations de mesures pendant l'année 2014. Enfin les résultats des stations de mesure seront comparés avec celles du modèle.

1. Etat de la pollution particulaire(PM10) durant l'année 2014 dans la RGC :

1.1.Description des stations de la qualité d'air dans la RGC :

Le réseau de mesure de la qualité de l'air au niveau de la RGC comporte 13 stations fixes qui assurent la surveillance des polluants suivant : SO₂, NO_x, O₃, CO, HT et PM10 (fig.42).

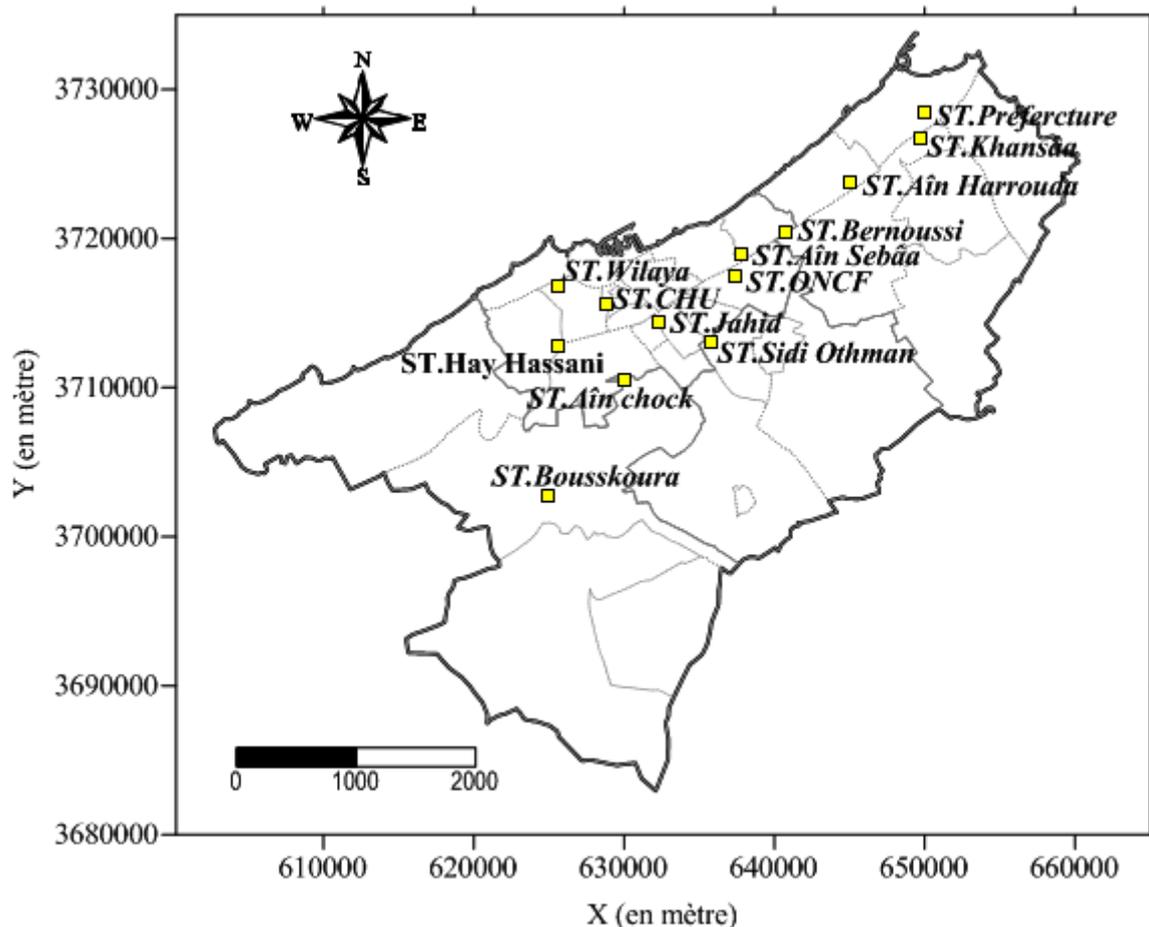


Figure 36 : Réseau de mesure de la qualité d'air au niveau de la RGC

Toutes ces stations sont de type urbain, sauf celle de l'ONCF qui est de type industriel :

- La station CHU est située au centre ville de Casablanca proche de la côte, implantée au sein de l'hôpital des enfants Ibnou-Rochd,
- La station de la WILAYA se situe au centre de la ville en face de la Wilaya de la ville,
- La station ONCF est située dans le site industriel d'Ain Sebâa près du quartier résidentiel du chemin de fer à Casablanca au sein d'un club sportif,
- La station d'Ain Sebâa est située près du boulevard de Moulay Ismail qui assure une liaison routière très importante entre le port et l'autoroute de la ville de Mohammedia,

- La station JAHID est installée au sein de l'école Aljahid au quartier Derb Sultan,
- La station KHAN est située au centre-ville de Mohammedia au sein de l'école Alkhansaa.
- La MOHPREF est située dans un bâtiment dans la préfecture de Mohammedia.
- La Station Sidi Othmane est installée dans le quartier Sidi Othmane à Casablanca.
- La station de Hay Hassani est située au niveau du siège de la Direction de Météorologie Nationale à Hay Hassani.

1.2. Etat de la qualité d'air en PM10 dans la RGC au cours de l'année 2014 selon les 13 stations :

Le pourcentage des données journalières disponibles pour les PM10 ainsi que leur moyenne pour chaque station de mesure pendant 2014 dans la RGC sont présentées dans le tableau ci-dessus (tab.9).

Tableau 9 : Moyenne annuelle et le taux de disponibilité des concentrations journalières en PM10 en 2014 sur la RGC

Stations	% données disponibles	Moyenne en $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ain Chock	48,77	37,48
Ain Harrouda	54,79	39,40
Ain Sebaa	83,01	44,79
Bernoussi	67,67	50,87
Bouskoura	57,26	52,14
Hay Hassani	92,05	32,72
JAHID	48,77	15,22
KHAN	94,25	17,55
MOHPER	65,75	49,61
ST_01:CHU	77,53	77,67
ST_02:ONCF	67,67	35,96
ST_05:Sidi Otmane	77,81	36,38
Wilya	62,74	65,07

1.2.1. Profil annuel:

Au niveau de la région du grande Casablanca, les concentrations de PM₁₀ pendant 2014, varient entre $0\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station CHU (ST_01) et $524\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station de Bouskoura. D'autre part, les valeurs des concentrations en PM₁₀ sont moins dispersées ainsi, plus de 75% des valeurs enregistrées sont inférieures à $97\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3^{ème} Quartile) (fig.37).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des sites de CHU, de la Wilaya, MOHPER, Bouskoura et de Bernoussi. Leurs moyennes et les plages de leurs moyennes sont ensiblement similaires à l'exception de la station Khansaa.

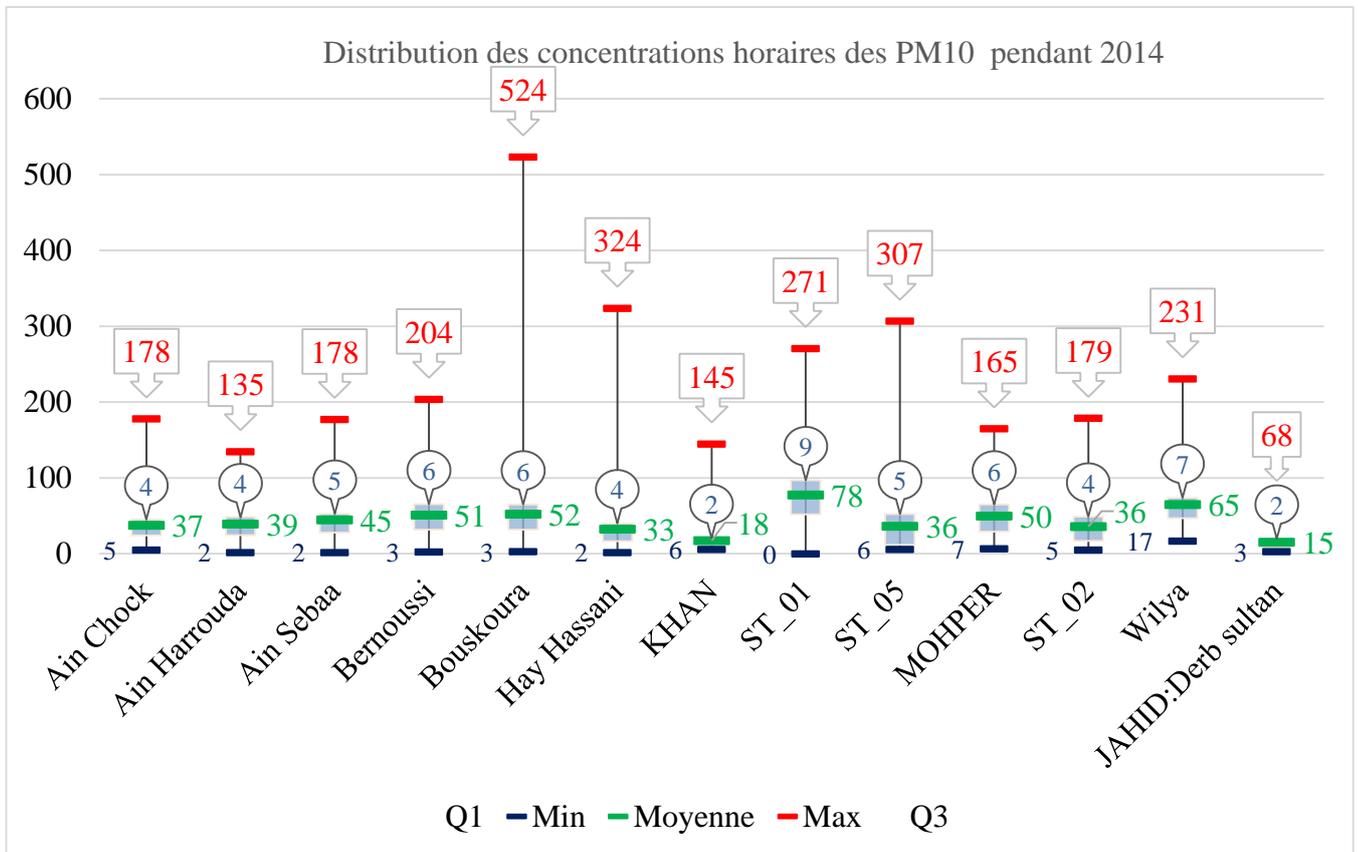


Figure 37 : Diagramme en boîtes de Tuckey : données statistiques des concentrations horaires en PM10 dans la RGC pendant 2014

Les valeurs signalées au niveau de la station de Bouskoura sont liées aux activités de la cimenterie Lafarge installée dans ce secteur, tandis que pour le site de MOH-PREF est sous l'influence des émissions de la puissante unité de production de l'énergie d'origine thermique (CTM) ; des émissions des carrières avoisinantes et des embruns marins. Pour la station de Sidi Bernoussi les rejets sont dus aux activités industrielles connues dans cet endroit alors que pour le site de la Wilaya les valeurs enregistrées sont fortement liées à l'intensité du trafic routier au niveau des grands Boulevards.

Cependant, il est intéressant de noter que l'interprétation des résultats de la pollution particulaire demeure un peu délicate en raison de la multiplicité des sources d'émission locale informelle. Or, les particules en suspension peuvent provenir aussi des activités humaines, telle qu'au moment de la récréation des écoles, travaux de construction, comme elles peuvent être provoquées par l'érosion, les feux, ou le vent local. Ce dernier à vitesse élevée, en touchant directement les analyseurs de mesure peut induire des concentrations fortes.

1.2.2. Evolution mensuelle :

L'évolution des moyennes mensuelles met en évidence des concentrations plus importantes au niveau des sites de proximité industrielles (Ain Sebâa, Bernoussi et Ain Harrouda) par rapport aux sites de proximité automobile (Wilaya et Hay Hassani) (fig.38). Ceci confirme les résultats de l'inventaire des émissions de PM10 sur la RGC en 2010 (87% des particules proviennent des sources industrielle et 12% des sources automobiles). Sauf pour les mois d'été (période des congés et ramadan), où on remarque que la moyenne pour les sites de proximité automobile est plus importante que la moyenne pour les sites impactés par l'activité industrielle.

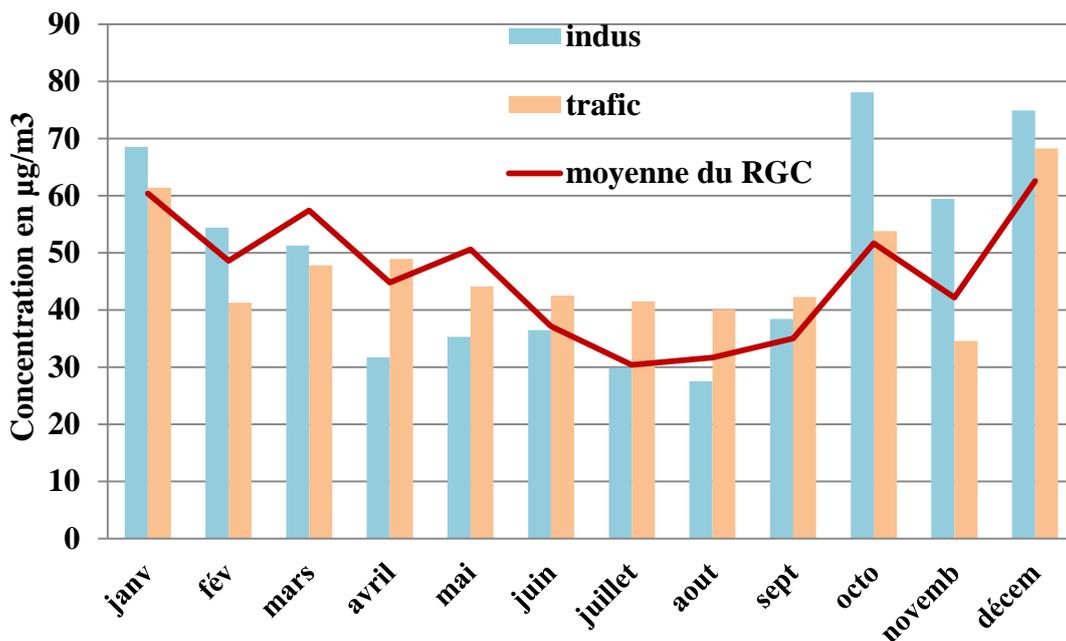


Figure 38 : Evolution mensuelle des PM10 dans la RGC

On remarque aussi que les concentrations mensuelles sont plus élevées durant la période hivernale liées aux mauvaises conditions de dispersion (42% des jours sont défavorable à la dispersion) surtout que ces mois ont connu durant 2014 des précipitations qui ne sont pas très importantes (51 mm en janvier, 16mm en février et 28mm en décembre).

1.2.3. Evolution hebdomadaire :

L'évolution des moyennes hebdomadaires varient presque de la même façon au niveau de toute les stations (fig.39). Une diminution des concentrations des PM10 visible vers la fin de la semaine s'explique par une réduction du trafic routier alors qu'elles augmentent progressivement dès le début de la semaine.

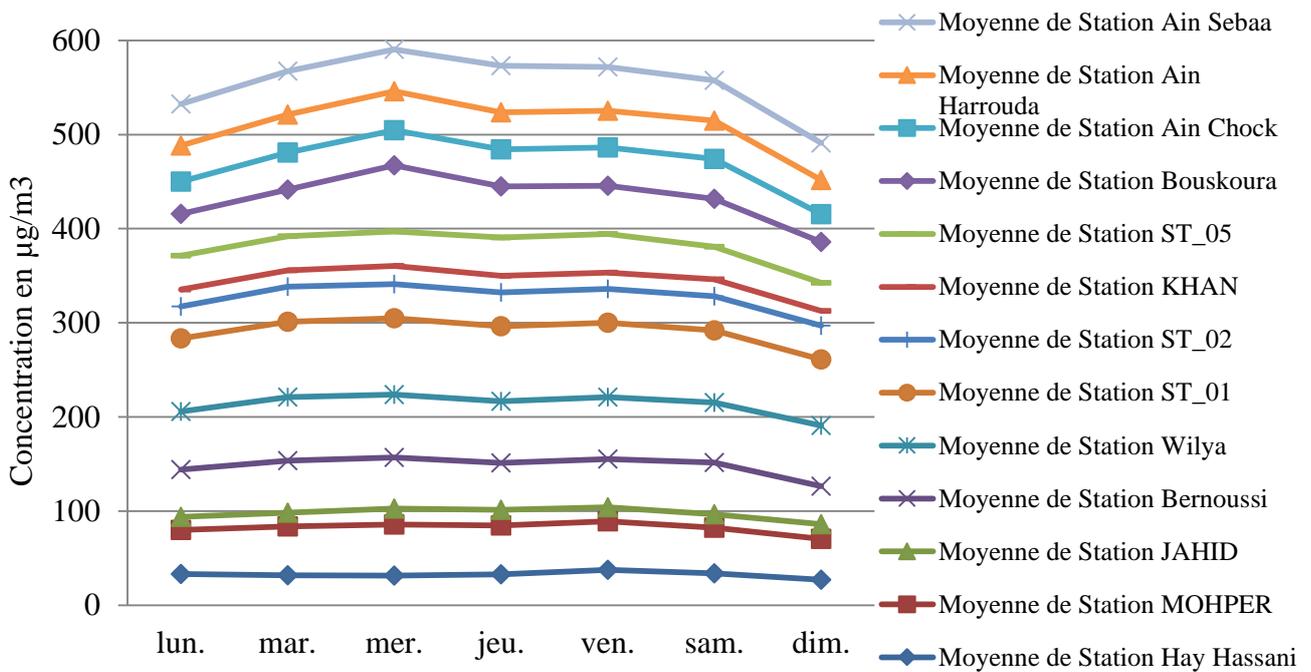


Figure 39 : Le profil moyen hebdomadaire des PM10 dans la RGC en 2014

1.2.4. Les PM10 et la protection de la santé :

Le calcul du percentile 90.4 des moyennes journalières pour les particules en suspension avec un diamètre inférieur à 10micron, révèle qu'il y a dépassement de la valeur limite pour la protection de la santé fixée par le décret N°2-09-286 du 8 décembre 2009 (50µg/m³) au niveau presque de toutes les stations de la région, sauf JAHID et KHANSAA(fig.40).

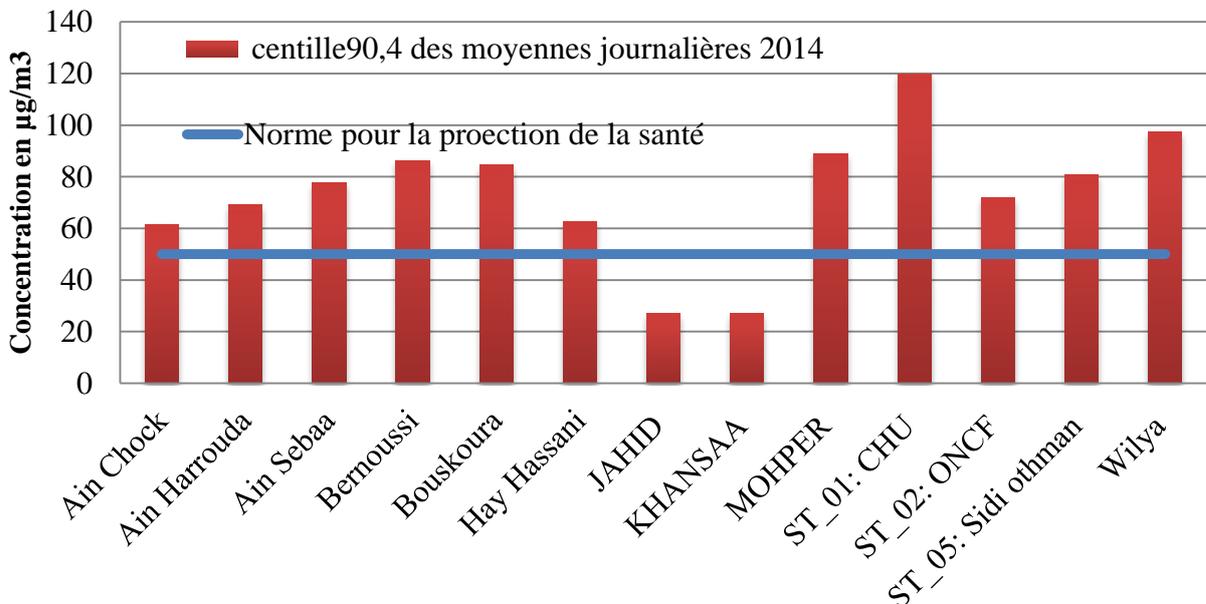


Figure 40 : Profil des centiles 90.4 des concentrations moyennes journalières en PM10 selon les treize stations

Il est à noter que, les valeurs les plus élevées rencontrées au niveau de la station de CHU pendant 2014 ne sont pas dû seulement au trafic routier mais aussi aux travaux de construction d'un nouveau service des urgences et la restauration des blocs opératoires.

2. Comparaison modèle/station :

La comparaison des résultats observés au niveau des stations fixes ainsi les résultats prédits par le modèle est effectuée via QQ plot (fig.41). En effet le modèle Aermot adopte deux courbes de références $Y=2X$ et $Y=0.5X$. Si les valeurs se trouvent à l'intérieur des deux courbes cela signifie que le modèle simule correctement les concentrations en PM10.

Le modèle a tendance à sous-estimer les niveaux de PM10 élevées pour toutes les stations (fig.41). Cela peut être pour origine les sources de pollution à l'échelle locale près des stations de mesures qui ne sont pas prises en considération lors de l'inventaire. Pour les faibles concentrations, on constate que le modèle surestime les concentrations des PM10 pour la station CHU. Cette surestimation peut être expliquée, durant cette période, par la baisse significative du trafic routier (travaux d'aménagements) à proximité de la station CHU.

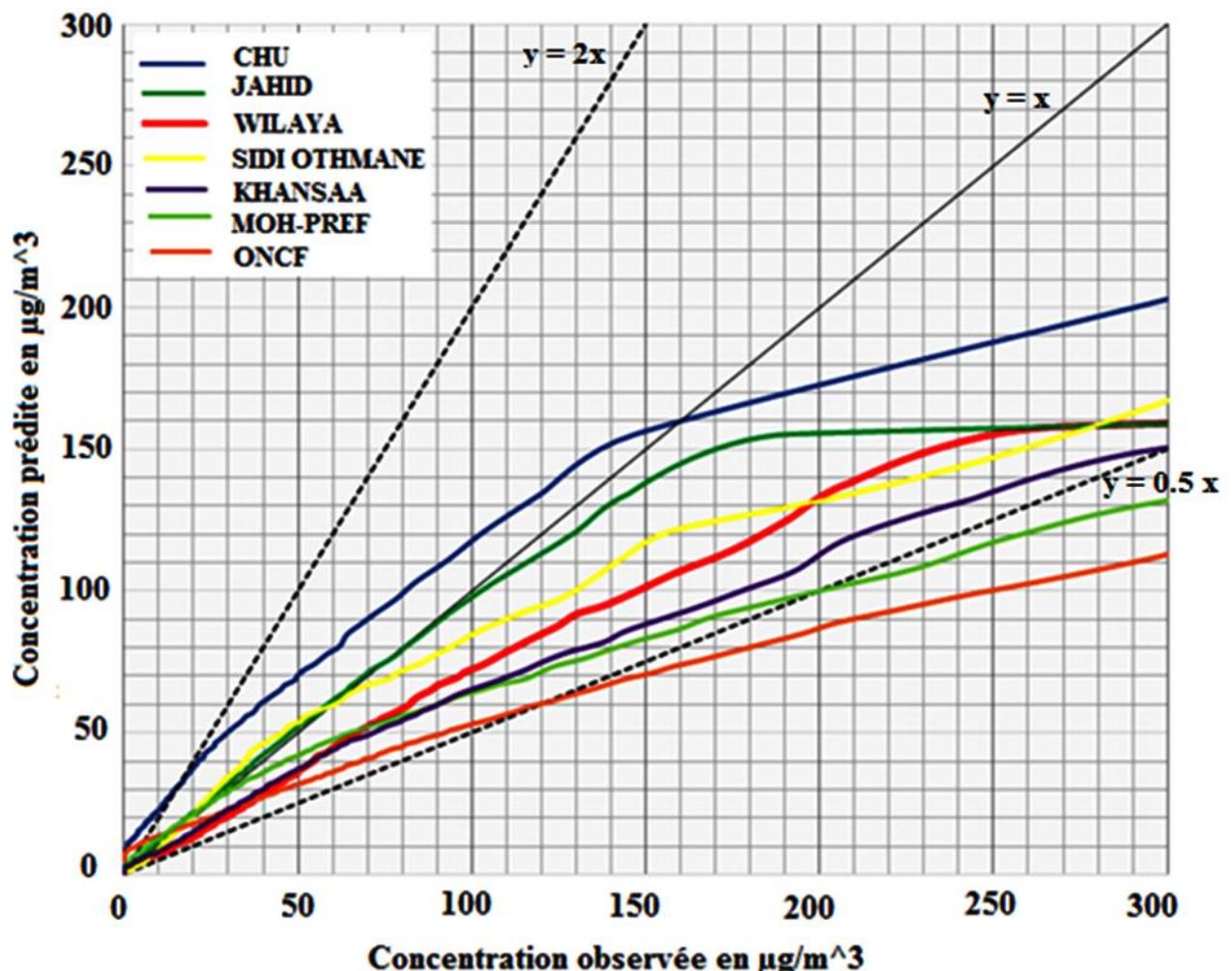


Figure 41: Diagramme QQ plot des concentrations horaires observées et prévues de PM10 pour 2014

L'objectif de la phase de comparaison des résultats des stations et de l'étape de modélisation et d'évaluer l'exactitude du modèle. Il ressort de l'étude menée que les données des stations présentent une forte variabilité spatio-temporelle que le modèle ne parvient pas à reproduire. Cela peut s'expliquer par plusieurs raisons :

- ✓ L'utilisation d'un cadastre d'émission qui ne tient pas en compte toutes les sources de particules primaires (sources anthropique et naturelle),
- ✓ L'influence des particules secondaires provenant de transformations chimiques de polluants gazeux qui réagissent entre eux pour former des particules, du transport à long distance, ou de la remise en suspension des poussières déposées au sol. La contribution de ces sources est plus difficile à estimer et à inclure dans le modèle,
- ✓ Les phénomènes locaux près des stations de surveillance, comme la présence de travaux ou de re-envol de poussières en fonction des conditions météorologiques, ont un impacte sur les niveaux mesurés ; ces phénomènes sont extrêmement difficiles à évaluer et à intégrer dans le modèle.
- ✓ L'influence de la variation temporelle des émissions de sources modélisées, qu'on n'a pas pu l'inclure dans ce cadre.
- ✓ Les concentrations de fond intégré dans le module ne sont pas représentatives de l'ensemble du territoire de la région et leur utilisation en tant que pollution de fond conduit à une surestimation ou une sous-estimation des concentrations.

3. Recommandations :

La problématique de la pollution particulaire nécessite des solutions locales et régionales afin de réduire toutes sortes de particules d'origine anthropique venant de l'agriculture, du bâtiment (particules de la construction), de la combustion, des procédés industriels et surtout de la circulation routière. Cette dernière source demeure un souci majeur, que les autorités locales de la RGC doivent se concentrer et chercher des solutions, comme par exemple:

- la réduction générale de la circulation automobile par amélioration des transports en commun ;
- l'équipement des camions et des voitures de tourisme avec des filtres à particules, dont l'efficacité même pour les particules ultrafines doit être assurée ;
- l'interdiction de l'accès à la ville pour les camions et les voitures sans filtre ;
- Instauration des stratégies permettant la fluidité de la circulation ;
- l'amélioration de l'état du revêtement des rues, etc.

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur deux volets : un volet de benchmarking dont l'objectif d'évaluer l'expérience marocaine en matière de la surveillance de la qualité d'air et de mieux connaître les pratiques des pays développés, afin d'identifier les démarches adéquates à mettre par la DMN.

Ce travail de comparaison a permis d'identifier de nombreux points pour lesquels la DMN dispose d'atouts dans la surveillance de la qualité. Il montre également que l'organisme marocain dispose de moyens importants à l'instar des autres pays (stations fixes, stations mobiles, inventaires des émissions atmosphériques et modélisation cartographique).

Toutefois, des moyens forts à déployer par les directions régionales de la DMN afin : 1°) d'assurer la surveillance et la diffusion des données relatives à la qualité de l'air sur leur territoire 2°) mettre en œuvre un moyen réglementaire permettant de faciliter l'installation des sites de mesure 3°) sécuriser le dispositif et d'assurer sa pérennisation 4°) communiquer les données de la qualité d'air avec le grand public à travers l'implantation d'un système de communication des données de la qualité d'air et des procédures d'alerte via le site internet de la DMN ainsi que les différents médias.

Le deuxième volet concerne la mise en application de l'un des moyens majeurs existant au niveau de la DMN à savoir la modélisation cartographique de la qualité de l'air. Il consiste à cartographier la dispersion des PM10 afin de déterminer les zones d'impact maximal de pollution particulaire et le niveau de pollution associé à ces zones. Le principal objectif était donc de disposer d'une information sur la répartition spatiotemporelle des concentrations de PM10 sur la RGC pour l'année de 2014 et de prendre des mesures adéquates.

Différents tests ont permis de contraindre les différents choix de modélisation, aussi bien en termes de paramétrage du modèle, qu'au niveau du choix de la grille des récepteurs à utiliser ou de données météorologiques, d'occupation de sol et de la pollution de fond utilisées. La modélisation réalisée avec le modèle de qualité de l'air AERMOD pour une simulation complète, heure par heure, pour l'année 2014 sur l'ensemble de la région du Grand Casablanca a permis de calculer les concentrations maximales sur 1 heure, 24 heures et les moyennes annuelles des PM10.

L'analyse de ces concentrations maximales obtenues par AERMOD a permis de déterminer les zones les plus impactées par les émissions des PM10 (les axes routiers, au niveau du centre-ville de Casablanca, ainsi que sur les zones à proximité de la zone industrielle d'Ain Sebâa).

Les résultats de ce volet montrent la complexité générée par les PM10: Bien qu'une amélioration générale de la qualité de l'air à Casablanca ait été observée pendant 2014 par rapport à 2010, la baisse des niveaux de PM10 est loin d'être satisfaisante.

La cartographie de la pollution particulaire a montré que les valeurs limites n'ont pas été respectées dans la zone urbaine où le trafic est dense. L'accent doit être mis donc sur la pollution particulaire due au transport routier, puisque les résultats de l'étape de la modélisation montrent l'importance de la contribution des sources linéiques à la pollution en PM10 surtout dans la préfecture de Casablanca, où se concentre 84% de la population. Par conséquent des mesures de réduction des émissions routières s'avèrent nécessaire afin de minimiser l'impact sur la population.

La difficulté de la phase de comparaison modèle/station réside dans le fait que les données issues des stations de mesure présentent une forte variabilité spatio-temporelle, que le modèle ne parvient pas à reproduire. Cela s'explique par le fait que la RGC est une région en évolution continue et donc de nombreux changements de sources locales d'émissions peuvent apparaître d'un temps à l'autre. Ces changements locaux sont très difficiles à évaluer et à intégrer dans le modèle.

La variation spatio-temporelle des émissions ainsi qu'un certain manque de données sur les dimensions des bâtiments à proximité des sources n'ont pas permis d'exploiter toutes les fonctionnalités offertes par le modèle.

Pour cette raison que l'attention des responsables doit se focaliser sur la réalisation d'un inventaire des émissions atmosphérique plus avancé, qui inclut les sources naturelles (embruns marins, feux de forêts, érosion éolienne des sols par le vent, etc.) et les sources secondaires (particules secondaire, etc.). De même, des efforts considérables seront nécessaires pour parvenir à une réduction sensible des concentrations des particules. Ces réductions doivent comprendre non seulement des mesures locales ou régionales mais des mesures à l'échelle nationale et internationale. Du fait que des quantités importantes de particules fines peuvent provenir de transport à long distance (transport transfrontalier). D'autres quantités de particules peuvent provenir de la transformation chimique de certains gaz et des remises en suspension des particules déjà déposées ce qui rend plus difficile à les quantifier afin de réduire leur niveau dans l'atmosphère.

Annexes

Annexe 1 : Exemple de fichier d'entrée AERMET (Fichier météorologique)

Y	M	Day	H	Dir	Speed	T(°c)	CC
2014	1	1	15	321	4	15.5	3
2014	1	1	16	322	3	15	3
2014	1	1	17	320	0	14.5	5
2014	1	1	18	263	1	14	5
2014	1	1	19	240	1	13.3	3
2014	1	1	20	200	2	12.3	2
2014	1	1	21	194	1	12	2
2014	1	1	22	180	1	10.6	1
2014	1	1	23	189	2	10.6	1
2014	1	2	0	200	3	10.9	1
2014	1	2	1	200	2	10.6	1
2014	1	2	2	200	2	9.7	1
2014	1	2	3	200	3	9.2	1
2014	1	2	4	200	2	9.5	1
2014	1	2	5	180	3	9.1	2
2014	1	2	6	180	2	8.9	2
2014	1	2	7	180	3	9.5	2
2014	1	2	8	180	3	10	3
2014	1	2	9	200	2	10.6	4
2014	1	2	10	200	3	13.8	3

Annexe 2 : Exemple de fichier de contrôle (inputFile_Information)

```

InputFile_Information.txt - Bloc-notes
Fichier  Edition  Format  Affichage ?
-----
This file contains input file information
-----
Input file that contains input surface met information
"Casablanca_2014.txt"
-----
Output file that contains AERMOD formatted input surface met information
"Casablanca_2014.sfc"
-----
Output file that contains AERMOD formatted profile met information
"Casablanca_2014.pf1"
-----
z0,dh,Albedo,href
0.5,0.2,0.2,10
-----
lat,tshift
33.6,0
-----
Minimum wind speed, Minimum Heat flux, Minimum Mixed Layer Height
0.5, -200.0, 0.0
-----
Bo(1),Bo(2),Bo(3),Bo(4),Bo(5),Bo(6),Bo(7),Bo(8),Bo(9),Bo(10),Bo(11),Bo(12)
2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2
-----
Potential temperature gradient above mixed Layer Height: degrees per m
0.008
-----
Surface File Header Information: Do not change the format
18.500N 86.750W UA_ID: 00003881 SF_ID: 13876 OS_ID: 0 VERSION: 12345
-----
The century of the date: 2007 translates into 2000
2000
-----
Switch is equal to 'Y' if IMD data is one hour resolved
'Y'

```

Annexe 3 : Exemple de fichier de profil (Sortie AERMET)

Y	M	D	H	Lev	F	Dir	U	T(°C)	theta	w
13	12	31	24	10.0	1	196.	2.00	8.4	-999.0	-999.00
14	1	1	1	10.0	1	182.	2.00	8.0	-999.0	-999.00
14	1	1	2	10.0	1	181.	2.00	7.6	-999.0	-999.00
14	1	1	3	10.0	1	179.	1.00	7.0	-999.0	-999.00
14	1	1	4	10.0	1	179.	1.00	6.4	-999.0	-999.00
14	1	1	5	10.0	1	180.	1.00	6.0	-999.0	-999.00
14	1	1	6	10.0	1	185.	1.00	5.6	-999.0	-999.00
14	1	1	7	10.0	1	189.	3.00	6.0	-999.0	-999.00
14	1	1	8	10.0	1	201.	3.00	6.7	-999.0	-999.00
14	1	1	9	10.0	1	206.	3.00	8.5	-999.0	-999.00
14	1	1	10	10.0	1	210.	1.00	12.0	-999.0	-999.00
14	1	1	11	10.0	1	238.	2.00	15.0	-999.0	-999.00
14	1	1	12	10.0	1	260.	2.00	15.6	-999.0	-999.00
14	1	1	13	10.0	1	260.	2.00	16.6	-999.0	-999.00
14	1	1	14	10.0	1	320.	3.00	15.6	-999.0	-999.00
14	1	1	15	10.0	1	321.	4.00	15.5	-999.0	-999.00
14	1	1	16	10.0	1	322.	3.00	15.0	-999.0	-999.00
14	1	1	17	10.0	1	0.	.50	14.5	-999.0	-999.00
14	1	2	18	10.0	1	260.	1.00	16.2	-999.0	-999.00

Annexe 4 : Exemple de fichier de surface (sortie AERMET)

```

18.500N 86.750W      UA_ID: 00003881 SF_ID: 13876 OS_ID:0      VERSION: 12345
13 12 31 365 24 -25.4 .211 .000 .008 0. 222. 31.9 .500 2.00 .78 2.00 196. 10.0 8.4 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 1 -25.4 .211 .000 .008 0. 222. 31.8 .500 2.00 .78 2.00 182. 10.0 8.0 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 2 -25.4 .211 .000 .008 0. 222. 31.7 .500 2.00 .78 2.00 181. 10.0 7.6 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 3 -8.9 .074 .000 .008 0. 47. 3.9 .500 2.00 .78 1.00 179. 10.0 7.0 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 4 -8.9 .074 .000 .008 0. 46. 3.9 .500 2.00 .78 1.00 179. 10.0 6.4 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 5 -8.9 .074 .000 .008 0. 46. 3.9 .500 2.00 .78 1.00 180. 10.0 6.0 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 6 -8.9 .074 .000 .008 0. 46. 3.9 .500 2.00 .78 1.00 185. 10.0 5.6 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 7 -43.2 .358 .000 .008 0. 493. 91.2 .500 2.00 .78 3.00 189. 10.0 6.0 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 8 -43.2 .358 .000 .008 0. 493. 91.5 .500 2.00 .42 3.00 201. 10.0 6.7 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 9 62.5 .436 .535 .008 85. 661. -114.8 .500 2.00 .29 3.00 206. 10.0 8.5 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 10 125.4 .194 .998 .008 278. 200. -5.1 .500 2.00 .24 1.00 210. 10.0 12.0 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 11 165.3 .338 1.262 .008 431. 451. -20.6 .500 2.00 .22 2.00 238. 10.0 15.0 10.0 1 1.00 50. 1013. 0
14 1 1 1 1 12 184.7 .340 1.431 .008 562. 457. -18.9 .500 2.00 .22 2.00 260. 10.0 15.6 10.0 1 1.00 50. 1013. 3
14 1 1 1 1 13 172.5 .338 1.481 .008 671. 453. -20.0 .500 2.00 .22 2.00 260. 10.0 16.6 10.0 1 1.00 50. 1013. 3
14 1 1 1 1 14 134.4 .456 1.417 .008 751. 707. -62.5 .500 2.00 .24 3.00 320. 10.0 15.6 10.0 1 1.00 50. 1013. 3
1013. 2

```

Annexe 5 : Exemple de fichier AERMOD.inp

```

CO STARTING
  TITLEONE PFE_RGC_PM10_2014
  MODELOPT CONC FLAT BETA FASTALL LOWWIND2
  AVERTIME 1 24 PERIOD
  URBANOPT 3200000 Casablanca
  LOW_WIND 0.6 1 0.95
  POLLUTID PM10
  RUNORNOT RUN
  SAVEFILE SAVEFILE.sv1 3
  ERRORFIL ERRORFILE.err
CO FINISHED

SO STARTING
  LOCATION POINT01 POINT 635283 3717426 0
  SRCPARAM POINT01 0.035988609360731 13 746.3 3.41 0.4
  LOCATION LINE0001 LINE 623057.5 3710949.1 623185.4 3711041.3
  SRCPARAM LINE0001 9.71856E-007 0 25 1
  LOCATION VOLUME0001 VOLUME 602500 3709500
  SRCPARAM VOLUME0001 0 5 232.55813953488 4.6511627906977

SO FINISHED
RE STARTING
  DISCCART 620973.64 3709016.9
  DISCCART 621973.63 3709016.9
  DISCCART 622973.62 3709016.9

RE FINISHED

ME STARTING
  SURFFILE Casablanca_2014.sfc
  PROFFILE Casablanca_2014.pf1
  SURFDATA 13876 2006 BIRMINGHAM/MUNICIPAL_ARPT
  UAIRDATA 3881 2006 CENTREVILLE/WSMO
  PROFBASE 0 METERS
ME FINISHED

OU STARTING
  RECTABLE ALLAVE 1ST
  PLOTFILE 1 ALL 1ST HOUR.PLT
  PLOTFILE 24 ALL 1ST JOUR.PLT
  PLOTFILE PERIOD ALL PERIOD.PLT
  SUMMFILE SUMMFILE.sum
OU FINISHED

```

Annexe 6 : Chemins et Commandes importantes du modèle AERMOD

Commande	Type	Description	Paramètres	
Chemin de contrôle				
STARTING	Ob-N	Indique le début du chemin de	CO STARTING	
			Pas de paramètres	
TITLEONE	Ob-N	Permet de définir	CO TITLEONE (Title1)	
			(Title1)	Indique le 1 ^{er} titre
TITLETWO	Op-N	Permet de définir le 2 ^{ème}	CO TITLEONE (Title2)	
			(Title2)	Indique le 2 ^{ème} titre
MODELOPT	Ob-N	Options de Modélisation	CO MODELOPT DFAULT ou BETA CONC FLAT ...	
			DFAULT	Option par défaut
			BETA	Permet d'utiliser les options beta d'essai
			CONC	Calcul des concentrations
			FLAT	Terrain plat
			FASTAREA	Optimisation du temps de compilation pour les sources surfaciques
			FASTALL	Optimisation du temps de compilation pour toutes les sources
LOW_WIND	Op-N	Spécification des options pour LOWWIND1 et LOWWIND2	Pour LOWWIND1 CO LOW_WIND (SVmin) (WSmin)	
			ou Pour LOWWIND2 CO LOW_WIND (SVmin) (WSmin) (FRANmax)	
			(SVmin)	La valeur minimale de σ_v (0.01 à 1.0 m/s)
			(WSmin)	La valeur minimale de la vitesse du vent (0.01 à 1.0)
			(FRANmax)	la valeur maximale pour le facteur de méandre (entre 0.50 1.0)
AVERTIME	Ob-N	Périodes de calcul des moyennes	CO AVERTIME 1 2 3 4 6 24 MONTH PERIOD ou ANNUAL	
			1	calcul des moyennes horaires
			24	calcul des moyennes journalières
			MONTH	calcul des moyennes mensuelles
			ANNUAL	calcul des moyennes annuelles
URBANOPT	Op-R	Option de la dispersion en milieu urbain	Pour une seule zone CO URBANOPT (Urbpop) (Ururname) (UrbRug)	
			ou Pour plusieurs zones CO URBANOPT (UrbanID) (Urbpop) (Ururname) (UrbRug)	
			(UrbID)	Identification de la zone
			(UrbPop)	Population de la zone urbaine

			(UrbName)	Nom de la zone urbaine
			(UrbRug)	Rugosité de la zone urbaine
POLLUTID	Ob-N	Spécification du polluant	CO POLLUTID (Polluant)	
			(Polluant)	Identification du polluant (SO ₂ , NO ₂ , CO, PM ₁₀ , OTHER...)
RUNORNOT	Ob-N	Exécution du model complet ou non	RUNORNOT RUN ou NOT	
			RUN	Exécution complet du modèle
			NOT	traitement des données de configuration et rapporter les erreurs
SAVEFILE	Op-N	Permet de stocker les résultats	SAVEFILE (Savfil)	
			(Savfil)	Indique le nom du fichier à utiliser pour le stockage des résultats intermédiaires
ERRORFIL	Op-N	Permet d'afficher les	ERRORFIL (Erbil)	
			(Errfil)	Indique le nom du fichier à utiliser pour afficher les Erreurs
FINISHED	Ob-N	Indique la fin du chemin de control	CO FINISHING	
			Pas de parameters	
Chemin de source (SO)				
STARTING	Ob-N	Indique le début du chemin de source	CO STARTING	
			Pas de parameters	
ELEVUNIT	Op-N	Définit les unités d'entrée pour les élévations des sources	CO ELEVUNIT METERS ou FEET	
			METERS	Indique que l'unité d'entrée pour les altitudes est le Mètre
			FEET	Indique que l'unité d'entrée pour les altitudes est le feet (1 ft = 0.305 m)
LOCATION	Ob-R	Identifie les coordonnées des sources	Pour les sources ponctuelles SO LOCATION (SrcID) POINT (Xs) (Ys) (Zs)	
			(Srcid)	Identification de la source ponctuelle
			POINT	Source de type ponctuelle
			(Xs)	La coordonnée X de la source ponctuelle
			(Ys)	La coordonnée Y de la source ponctuelle
			(Zs)	L'élévation de la source au-dessus du niveau de la Mer
			Pour les sources linéiques SO LOCATION (SrcID) LINE (Xs1) (Ys1) (Xs2) (Ys2) (Zs)	
			(Srcid)	Identification de la source linéique
			LINE	Source de type linéique
			(Xs1)	La coordonnée X de début de la source linéique
			(Ys1)	La coordonnée Y de début de la source linéique
			(Xs2)	La coordonnée X de la fin de la source linéique
			(Ys2)	La coordonnée Y de la fin de la source linéique
			(Zs)	L'élévation de la source au-dessus du niveau de la Mer
			Pour les sources surfaciques LOCATION (SrcID) AREAPOLY (Xs) (Ys) (Zs)	
			(Srcid)	Identification de la source surfacique
			AREAPOLY	Source de type surfacique
			(X)	La coordonnée X de coin de la source surfacique
			(Y)	Le coordonnée Y de coin de la source surfacique
			(Z)	L'élévation de la source au-dessus du niveau de la Mer
			Pour les sources volumiques SO LOCATION (SrcID) VOLUME (Xs) (Ys) (Zs)	
			(SrcID)	Identification de la source volumique
VOLUME	Source de type volumique			
(Xs)	La coordonnée X du centre de volume			
(Ys)	La coordonnée Y du centre de volume			
(Zs)	de la source au-dessus du niveau de la mer			

SRCPARAM	Ob-R	Identifier les paramètres de base pour la source	Pour les sources ponctuelles	
			SO SRCPARAM (SrcID) (Ptemis) (Stkhgt) (Stktmp) (Stkvel)	
			(SrcID)	Identification de la source ponctuelle
			(Inemis)	Quantité émise de polluant (g/s)
			(Stkhgt)	La hauteur physique de libération de la pollution
			(Stktmp)	Température de sortie de gaz (K)
			(Stk v)	Vitesse de sortie de gaz (m/s)
				Diamètre de la source ponctuelle (m)
			Pour les sources linéiques	
			(SrcID)	Identification de la source linéaire
			(Lnemis)	Quantité émise de polluant (g/s.m2)
			(Relhgt)	La hauteur physique de libération de la pollution par la source au-dessus de sol (m)
			(Width)	Largueur de la source linéaire (m)
			(Szinit)	Dimension verticale initiale de la source
			Pour les sources surfaciques	
			SO SRCPARAM (SrcID) (Aremis) (Relhgt) (Nverts) (Szinit)	
			(Srcid)	Identification de la source surfacique
			(Aremis)	Quantité émise de polluant (g/s.m ²)
			(Relhgt)	La hauteur physique de libération de la pollution par la source au-dessus de sol (m)
			(Nverts)	Nombre de sommets de polygone
(Szinit)	Dimension verticale initiale de la source linéaire			
Pour les sources volumiques				
(Srcid)	Identification de la source			
(Aremis)	Quantité émise de polluant (g/s)			
(Relhgt)	Centre de hauteur			
(Syinit)	Dimension latéral initial			
(Szinit)	Dimension vertical initial			
AREAVERT	Ob-R	Indique l'emplacement des sommets pour une source de type AREAPOLY (obligatoire si la source AREAPOLY est utilisée)	SO AREAVERT (SrcID) (Xv1) (Yv1) (Xv2) (Yv2) ... (Xvi) (Yvi)	
			SrcID	Identification de la source surfacique
			(Xv1), (Yv1), (Xv2), (Yv2), ... (Xvi),	Coordonnées des vertex
BACKGRND	Op-R	Permet de définir les variations temporelles des concentrations de fond	SO BACKGRND (BGflag) (BGvalue(i)) ; i=1, ..., n	
			(BGflag)	Permet d'indiquer un variable de la concentration de fond (exemples: ANNUAL, SEASON, SEASHR,...)
			(BGvalue(i))	Permet d'énumérer les n valeurs de la variable (ANNUAL (n=1), SEASON (n=4), SEASHR (n=96), ...)
			SO BACKGRND (HOURLY) (BGfilnam)	
			HOURLY	Indique que les concentrations de fond sont spécifiées dans un fichier séparé
			(BGfilnam)	Permet d'indiquer le nom de fichier
BACKUNIT		définir l'unité des concentrations de fond	CO BACKUNIT (BGunits)	
			BGunits	Permet d'indiquer l'unité (PPB, PPM ou UG/M3)
URBANSRC	Op-R	Identifie les sources à modéliser avec les effets urbains	Plusieurs zones SO URBANSRC (UrbanID) (SrcID's) et/ou (SrcRng's)	
			Une seule zone SO URBANSRC (SrcID's) et/ou (SrcRng's)	
			(UrbanID)	identification de la zone urbaine

			(SrcID's)	identification des sources
			(SrcRng's)	Identifications des groupes
SRCGROUP	Ob-R	Permet de regrouper plusieurs sources dans un seul groupe	SO SRCGROUP (SrcGrpID) (SrcID's) (SrcRange's)	
			(SrcGrpID)	Identification du groupe
			(SrcID's)	L'identification de la source a regroupé dans le groupe
			(SrcRange's)	Les identifications des sources à regrouper dans ce groupe
			ALL	Permet de regrouper toutes les sources en un seul groupe
FINISHED	Ob-N	Indique la fin du chemin de source	CO FINISHING	
			Pas de paramètres	
Chemin de récepteur (RE)				
STARTING	Ob-N	Indique le début du chemin de source	CO STARTING	
			Pas de parameters	
ELEVUNIT		Définit les unités d'entrée pour les élévations des récepteurs	CO ELEVUNIT METERS ou FEET	
			METERS	Indique que l'unité d'entrée pour les altitudes est le mètre
			FEET	Indique que l'unité d'entrée pour les altitudes est le feet (1 ft = 0.305 m)
GRIDCART	Op-R	Définit la grille réceptrice cartésienne	CO GRIDCART (Netid) STA XYINC (Xinit) (Xnum) (Xdelta) (Yinit) (Ynum) (Ydelta) CO GRIDCART (Netid) END	
			(Netid)	Identification de la grille
			STA	Indique le début d'entrée pour le sous chemin GRIDCART
			END	Indique la fin d'entrée pour le sous chemin GRIDCART
			XYINC	Une sous-commande qui permet d'indiquer que la grille des récepteurs est générée à partir des incréments de x et y
			(Xinit)	Lieu de départ de l'axe x en mètres
			(Xnum)	Nombre de récepteurs de l'axe x
			(Xdelta)	Distance entre les récepteurs de l'axe x
			(Yinit)	Lieu de départ de l'axe y en mètres
			(Ynum)	Nombre de récepteurs de l'axe y
(Ydelta)	Distance entre les récepteurs de l'axe Y			
DISCCART	Op-R	Définit les emplacements des récepteurs	RE DISCCART (Xcoord) (Ycoord)	
			(Xcoord)	La coordonnée X de récepteurs
			(Ycoord)	La coordonnée Y de récepteurs
INCLUDED		permet d'inclure dans le modèle le fichier des récepteur générer par	RE INCLUDED (RecIncFile)	
			(RecIncFile)	Le nom du fichier des récepteurs généré par AERMAP
FINISHED	Ob-N	Indique la fin du chemin de source	CO FINISHING	
			Pas de paramètres	
Chemin d'évènement (EV)				
STARTING	Ob-N	Indique le début du Chemin des évènements	EV STARTING	
			Pas de parameters	
EVENTPER	Ob-R	Décrit l'évènement et sa durée moyenne	EV EVENTPER (Evname) (Aveper) (Grpid) (Date) (Conc)	
			(Name)	Nom de l'évènement
			(Grpid)	Identification du groupe de l'évènement
			(Aveper)	La durée moyenne de l'évènement
			(Date)	La date de l'évènement
(Conc)				
EVENTLOC	Ob-R	Décrit la position de L'évènement	EV EVENTLOC XR= (Xr) YR= (Yr)	
			(Xr)	La coordonnée X de l'évènement

			(Aveper)	spécification de la période pour stocker les
			(GrpID)	Spécification du groupe de sources
			(Hivalu)	sélection du classement de la concentration à afficher
			(Filnam)	Le nom de fichier pour stocker les données
POSTFILE	Op-R	Permet de stocker les résultats pour un traitement ultérieur	OU POSTFILE (Aveper)	
			(Aveper)	spécification de la période pour stocker les
			(GrpID)	Spécification du groupe de sources
			(Hivalu)	sélection de la concentration à afficher
			(Filnam)	Le nom de fichier destiné à stocker les données
RANKFILE	Op-R	Permet de stocker les résultats dans un fichier destiné au traçage du diagramme quantile- quantile	OU RANKFILE	
			(Aveper)	spécification de la période pour stocker les
			(Hinum)	Nombre de valeurs maximales a affiché
			(Filnam)	Le nom du fichier destiné à stocker les données
EVENTOUT	Ob-N	Permet de spécifie les informations de sortie pour les évènements	OU EVENTOUT	
			SOCONT	Fournir la contribution de l'évènement à la Pollution
			DETAIL	Inclure les concentrations horaires pour chaque source et les données météorologiques horaires dans le fichier de sortie
SUMMFILE	Op-N	Permet de stocker les concentrations hautement classé dans un fichier séparé	OU SUMMFILE	
			(SumFilNam)	Le nom de fichier utilisé pour l'enregistrement des données
FINISHED		Indique la fin du chemin de source	ME FINISHING	
			Pas de paramètres	

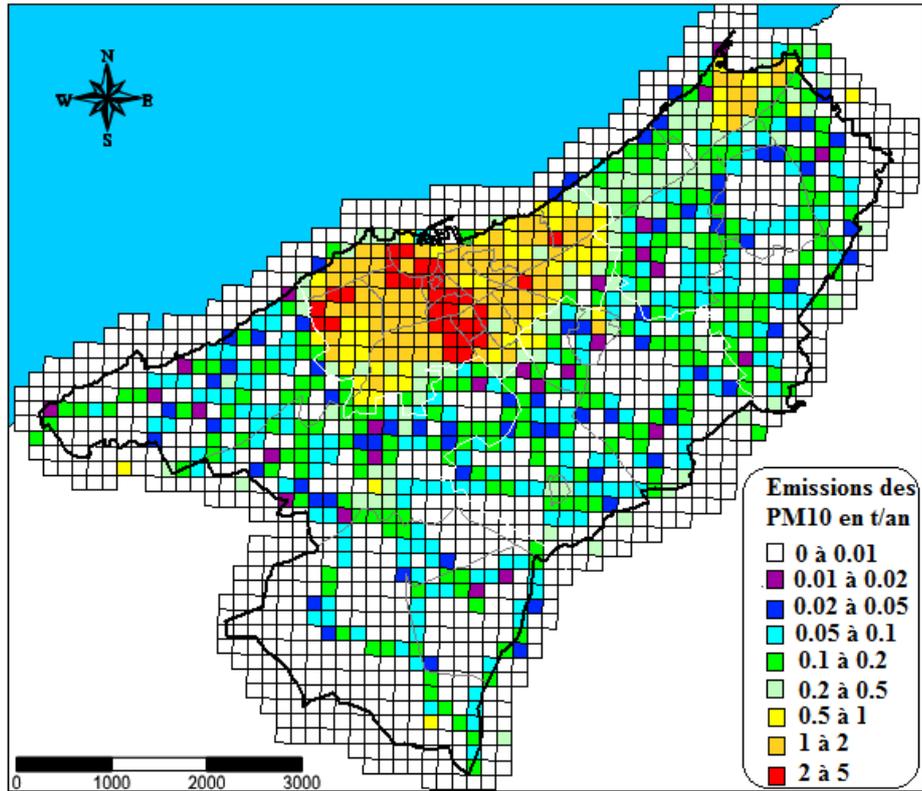
Annexe 7 : Exemple de fichier de sortie d'AERMOD

```

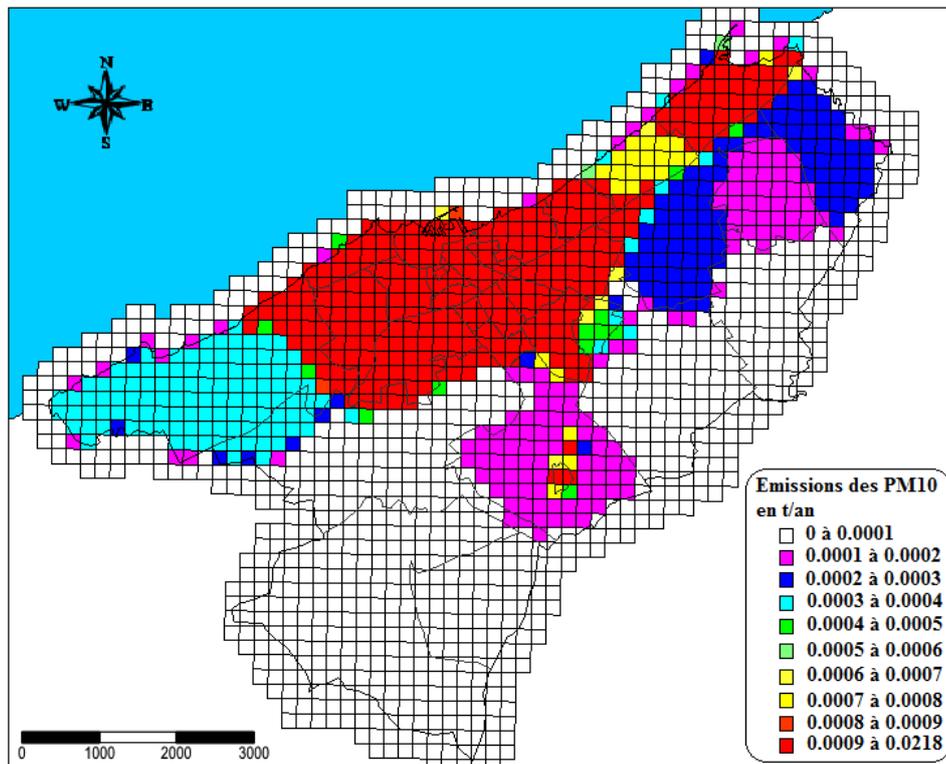
|* AERMOD ( 12345): PFE_RGC_PM10_2014                                05/26/15
|* MODELING OPTIONS USED:                                          11:04:25
|* NonDEFAULT CONC                                               FASTALL
|*
|*          BETA          FLAT
|*          LW2w/Mods
|* PLOT FILE OF HIGH 1ST HIGH 1-HR VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL
|* FOR A TOTAL OF 4593 RECEPTORS.
|* FORMAT: (3(1X,F13.5),3(1X,F8.2),3X,A5,2X,A8,2X,A5,5X,A8,2X,I8)
|*
|* X Y AVERAGE CONC ZELEV ZHILL ZFLAG AVE GRP RANK NET ID DATE(CONC)
|*
620973.64000 3709016.90000 6.64131 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14120118
621973.63000 3709016.90000 7.08809 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14103004
622973.62000 3709016.90000 7.54768 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14092218
623973.62000 3709016.90000 5.98145 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14110121
624973.63000 3709016.90000 5.59969 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14103123
625973.62000 3709016.90000 6.00867 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14092220
626973.63000 3709016.90000 8.20092 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14102906
627973.62000 3709016.90000 7.87157 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14092205
628973.62000 3709016.90000 5.27899 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14102919
629973.63000 3709016.90000 8.13628 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14121616
635973.63000 3709016.90000 5.45769 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14103117
636973.62000 3709016.90000 5.19272 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14103117
637973.63000 3709016.90000 6.77662 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14082305
638973.62000 3709016.90000 6.57094 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14090905
639973.63000 3709016.90000 6.24084 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14103021
620973.63000 3710016.91000 7.31488 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14092118
621973.63000 3710016.91000 7.95801 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14103018
622973.62000 3710016.91000 7.17462 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14120118
623973.62000 3710016.91000 11.04684 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14110121
624973.63000 3710016.91000 6.73180 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14092218
625973.63000 3710016.91000 6.44097 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14100301
626973.63000 3710016.91000 10.17325 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14100301
627973.62000 3710016.91000 6.22440 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14070904
628973.62000 3710016.91000 5.76056 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14082203
629973.63000 3710016.91000 6.29147 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14102919
630973.63000 3710016.91000 6.64264 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14101824
631973.62000 3710016.91000 6.11400 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14110304
634973.63000 3710016.91000 6.16302 0.00 0.00 0.00 1-HR ALL 1ST 14103117

```

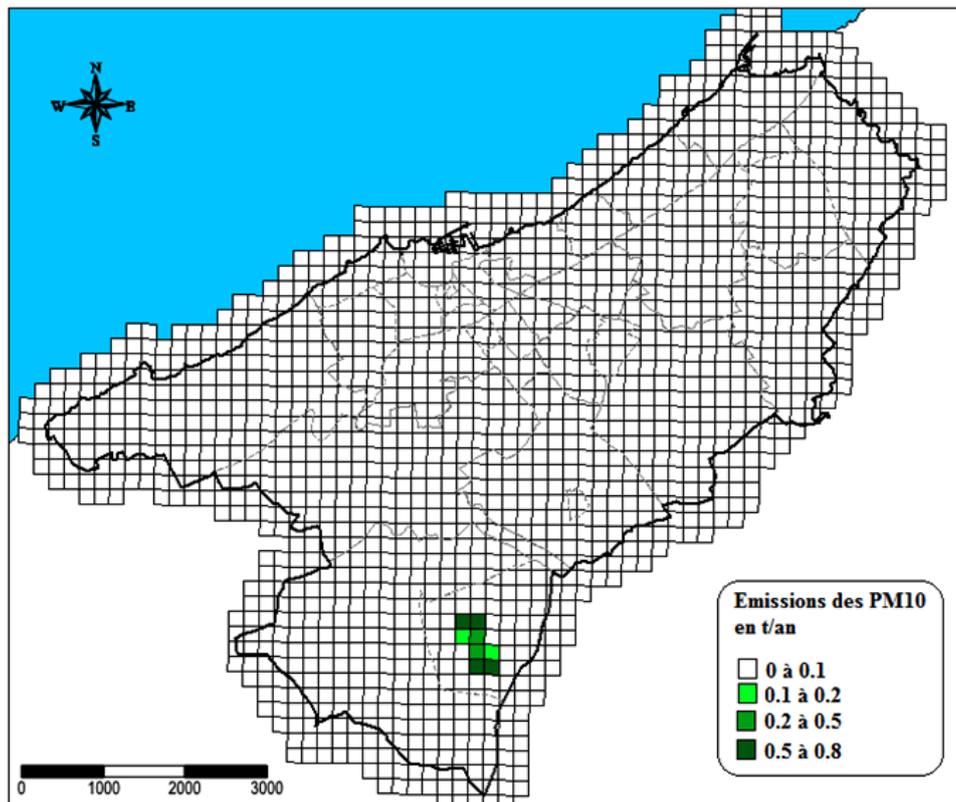
Annexe 8 : Cartographie des émissions des sources volumiques



Cartographie des émissions des PM10 relatives aux sources routières surfaciques (Routier secondaire)

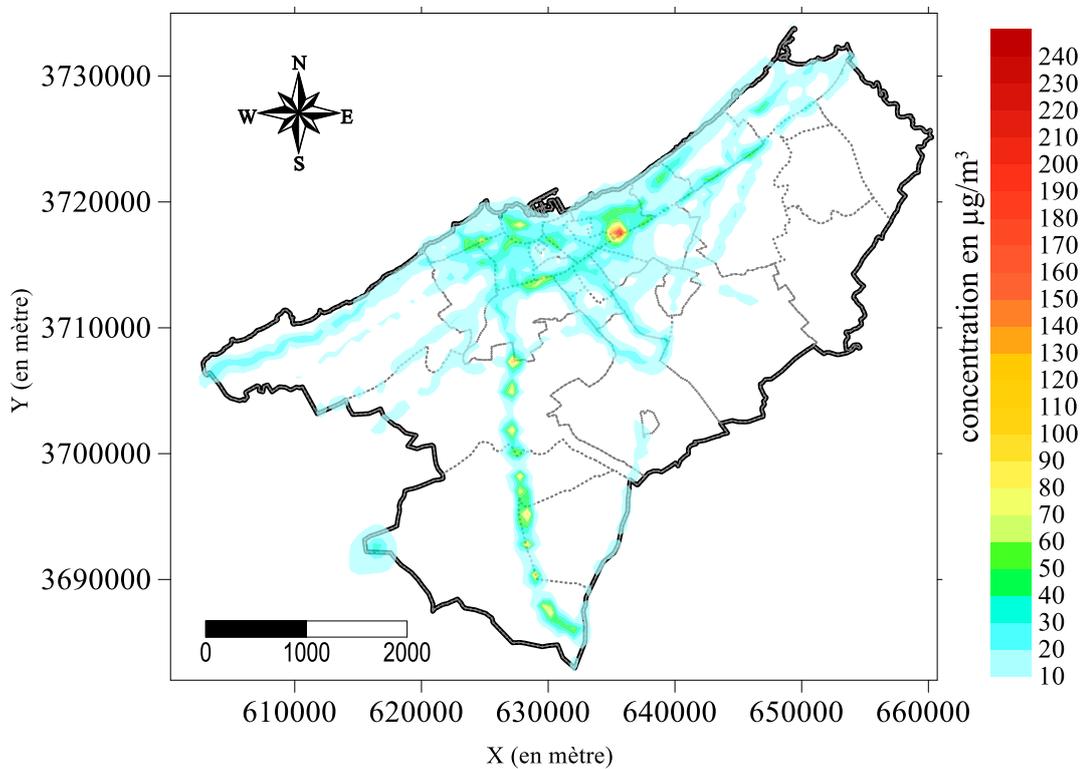


Cartographie des émissions des PM10 relatives aux secteurs Résidentiel/tertiaire



Cartographie des émissions des PM10 aéroportuaire (Cycle LTO)

Annexe 9 : Simulation de la dispersion des concentrations moyennes horaires



Références Bibliographiques

- [1] ADEME-Direction de l'Air et des Transports-Département Air, 2002. - Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air. Rapport interne ADEME.
- [2] Airparif, 2011. - BILAN DE L'AUDIT DE L'US EPA, Rapport interne.
- [3] Ait Bouh H., 2013. - Variations Saisonnières des particules atmosphériques et ses composants chimiques dans la Ville de Meknès- Maroc, CNESTEN.
- [4] ASPA et AIRLOR, 2010 -Surveillance de la Pollution de l'Air en Allemagne, ASPA.
- [5] Atmo-Rhône-Alpes, 2010. - Surveillance de la qualité de l'air en Suisse, ATMO France.
- [6] Atmo-Rhône-Alpes, 2011. -Surveillance de la qualité de l'air en Autriche, Rapport » Atmo-Alpes.
- [7] BARNEOUD P., 2010. - Développement d'un modèle de fluctuations de concentration pour la dispersion atmosphérique de contaminants, université du Québec, Montréal.
- [8] BENABESS K., 2010. -Atelier sur les carburants propres et la qualité de l'air - Présentation sur le cadastre des émissions Atmosphériques, Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement.
- [9] BROCHETON F., MESBAH B., POULET.D et HOURDIN.G, 2010. - Modélisation de la pollution particulaire (PM10) - Détermination des zones homogènes de pollution, POLLUTION ATMOSPHERIQUE N° 206.
- [10] DMN, 2009. -Qualité de l'air, Rapport interne.
- [11] EPA, 2004. -User's Guide for the Ams/Epa Regulatory Model, U.S. Environmental Protection Agency, <http://epa.gov>.
- [12] Haut-commissariat au plan - Direction Régionale de Casablanca ,2010. - Monographie De la Région Du Grand Casablanca,», Rapport interne.
- [13] Haut-commissariat au plan -Direction Régionale du Grand Casablanca, 2014. - Annuaire statistique Régional du Grand Casablanca, Haut Commissariat au Plan.
- [14] JRAD A., BAAZAOUI H., 2008. -Environmental issues and air issues quality control in Tunisia, CITET-MEDD.
- [15] KCHIH H., 2007. - La qualité de l'air en Tunisie, Centre IFEDA.
- [16] Michelot N., Pesin C., Carrega P., 2013. - Modélisation de la dispersion atmosphérique des PM10 dans une vallée de l'arrière-pays cannois, Pollution atmosphérique, N° 220.
- [17] Ministère de l'Energie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, 2011. - Étude relative à la réalisation d'un diagnostic sur l'état des lieux de la pollution industrielle et l'élaboration d'un plan d'action relatif a la prévention et la lutte contre la pollution industrielle au niveau du grand Casablanca, Département de l'environnement.

- [18] Ministère de l'Énergie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, 2013. - Etat de l'environnement, Région du Grand Casablanca, Rapport interne Département de l'environnement.
- [19] Nord Pas de Calais- Ile de France, 2010. - Surveillance de la qualité de l'air en Norvège, ATMO France.
- [20] NUMTECH, 2013. -Projet FASEP Innovation Verte MAROC : Système de modélisation haute résolution pour le contrôle et la gestion de la qualité de l'air sur la Région du Grand Casablanca, Rapport interne DMN.
- [21] Secrétariat de l'état auprès du ministre de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, 2013. -Rapport National sur l'Etat de l'Environnement : Région Grand Casablanca, Département de l'environnement.
- [22] U.S Environmental Protection Agency.2014, -ADDENDUM USER'S GUIDE FOR THE AMS/EPA REGULATORY MODEL - aermol, EPA.
- [23] ZGHAI M., 2009. - Atmospheric particulate pollution in Kenitra, CNESTEN.

Webographie

- [24] - <http://www.umweltbundesamt.de/luft-e/>
- [25] - <http://tinyurl.com/5uluy88>
- [26] - <http://www.nilu.no/>
- [27] - <http://www.bafu.admin.ch/luft/>
- [28] - <http://www.epa.gov/gateway/learn/airpollution.html>;
- [29] - <http://www.airnow.gov/>
- [30] - <http://www.atmo-france.org/fr/>
- [31] - <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>
- [32] - [http:// www.anpe.nat.tn](http://www.anpe.nat.tn)
- [33] - <http://www.fm6e.org/fr/documentation/rapports-annuels.html> FM6
- [34] - <http://environnement.gov.ma/>
- [35] - <http://environnement.wallonie.be/>
- [36] - <http://www.notre-planete.info/>
- [37] - <http://www.archipel.uqam.ca/>
- [38] - <http://www.mtpnet.gov.ma/chiffrescles/Routier/Pages/Transport-routier-en-chiffres.aspx>.
- [39] - <http://www.airbreizh.asso.fr/polluants/les-particules-en-suspension/>.