



HAL
open science

Effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé respiratoire à Tunis

Safa Ben Romdhane

► **To cite this version:**

Safa Ben Romdhane. Effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé respiratoire à Tunis. Géographie. Université Sorbonne Paris Cité; Université des lettres, arts et sciences sociales - Tunis I. Faculté des sciences humaines et sociales, 2017. Français. NNT : 2017USPCC027 . tel-01881576

HAL Id: tel-01881576

<https://theses.hal.science/tel-01881576>

Submitted on 26 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé respiratoire à Tunis

Safa BEN ROMDHANE

Thèse de doctorat en géographie



Dirigée par Latifa HENIA, Gérard BELTRANDO & Malika MADELIN
Soutenue le 12 décembre 2017

Membre du jury :

Latifa HENIA	Professeur émérite à l'université de Tunis (directrice)
Gérard BELTRANDO	Professeur à l'université Paris Diderot (directeur)
Malika Madelin	Professeur à l'université Paris Diderot (directrice)
Habib BEN BOUBAKER	Professeur à l'université de La Manouba (président)
Pierre CARREGA	Professeur à l'université Nice Sophia Antipolis (rapporteur)
Taoufik EL MELKI	Professeur à l'université de La Manouba (rapporteur)
Salem DAHECH	Professeur à l'université Paris Diderot (examineur)

2017

Thèse de doctorat de
L'Université de Tunis, préparée à la
Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis
École Doctorale « Structures, Systèmes, Modèles et
Pratiques en Lettres et Sciences Humaines »
L'Unité de recherche « GREVACHOT » et de

L'Université Sorbonne Paris Cité
Préparée à l'Université Paris Diderot
École Doctorale 382 « Économie, Espaces, Sociétés, Civilisations »
l'UMR 8586 du CNRS (PRODIG)

Effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé respiratoire à Tunis

Safa BEN ROMDHANE

Thèse de doctorat en géographie

Dirigée par Latifa HENIA, Gérard BELTRANDO & Malika MADELIN
Soutenue le 12 décembre 2017

Membre du jury :

Latifa HENIA	Professeur émérite à l'université de Tunis (directrice)
Gérard BELTRANDO	Professeur à l'université Paris Diderot (directeur)
Malika Madelin	Professeur à l'université Paris Diderot (directrice)
Habib BEN BOUBAKER	Professeur à l'université de La Manouba (président)
Pierre CARREGA	Professeur à l'université Nice Sophia Antipolis (rapporteur)
Taoufik EL MELKI	Professeur à l'université de La Manouba (rapporteur)
Salem DAHECH	Professeur à l'université Paris Diderot (examineur)

2017

Titre : Effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé respiratoire à Tunis

Résumé :

Le Grand-Tunis présente une vulnérabilité face à la pollution atmosphérique compte tenu des fortes densités de population et des nombreuses infrastructures caractérisant son territoire. L'ozone (O₃) et les particules en suspension (PM10) dépassent fréquemment les normes tunisiennes relatives à ces polluants. Quant aux normes internationales fixées par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), elles n'ont été respectées que rarement.

L'appareil respiratoire constitue une voie d'exposition privilégiée aux agressions en rapport avec l'environnement. De nombreuses pathologies pulmonaires sont directement liées à l'inhalation des polluants dans l'atmosphère. Les influences des mécanismes climatiques sur la santé respiratoire sont très étendues également, notamment les épisodes météorologiques extrêmes appelés aussi paroxysmes météorologiques.

L'objectif principal de cette thèse est de caractériser l'impact des facteurs environnementaux, climat et polluants atmosphériques sur la santé respiratoire dans le Grand-Tunis. Nous avons choisi de quantifier cette relation à partir des indicateurs biométéorologiques et des seuils absolus de stress météorologique, spécifiques au climat tunisois, et de la qualité de l'air pour prévoir des épisodes à risque pour la santé respiratoire. Cela est fait à partir des extrêmes météorologiques des paramètres les plus irritants pour la santé respiratoire : la température, l'humidité relative de l'air et la vitesse maximale du vent. Nous avons aussi établi des normes réalistes pour la qualité de l'air, relatives à l'O₃ et aux PM10, identifiant les seuils critiques de surplus des hospitalisations dans le Grand-Tunis et qui peuvent être appliquées dans tout le pays. Compte tenu de l'effet de certains paramètres climatiques sur la dispersion des polluants dans l'atmosphère, nous avons aussi étudié la relation entre les paramètres météorologiques et les polluants d'O₃ et de PM10.

Les résultats de cette étude révèlent que, durant toute l'année, les tunisois sont confrontés au moins à un risque environnemental : la pollution photochimique et les vagues de chaleur, très répandues durant la saison chaude ; durant la saison froide, c'est le risque du froid et de la pollution particulaire ; et pendant les intersaisons, c'est la pollution biologique, avec les pollens, qui est le risque le plus important. Toutefois, l'exposition à court terme à ces risques, sur l'aggravation de la maladie respiratoire ou l'irritation du système respiratoire sont bien réelles.

Cette recherche montre que le développement et l'aggravation des maladies respiratoires semblent découler d'une interaction complexe entre divers facteurs individuels et environnementaux. Ils sont essentiellement en relation avec le temps, la qualité de l'air et l'atopie. L'importance de ces facteurs varie selon la maladie considérée. Par ailleurs, le faible niveau socioéconomique de la famille augmente la probabilité d'être exposé à plusieurs de ces facteurs de risque. À cela s'ajoutent les facteurs comportementaux tels que l'alcool, le tabagisme actif et passif.

Mots clés : Grand-Tunis, Ozone, PM10, pathologies respiratoires, asthme, extrême météorologique, seuil biométéorologique, type de temps, facteurs de risque.

Title : The impact of weather and air pollution on respiratory health in Tunis.

Abstract :

The Greater metropolitan area of Tunis, often referred to as Grand Tunis or Tunis, presents a vulnerability to air pollution due to the high concentrations of population and the infrastructures characterizing its territory. Ozone (O₃) and particles (PM₁₀) often exceed the Tunisian thresholds for these pollutants. As for the international standards set by the WHO (world health organization), they have not been met infrequently.

The respiratory tract is a preferred route of exposure to aggressions related to the environment. Many lung diseases are directly linked to inhalation of pollutants in the atmosphere. The influences of climate mechanisms on respiratory health are also very extensive, including extreme weather events, also called weather paroxysms.

The main objective of this thesis was to characterize the impact of environmental factors, climate and atmospheric pollutants on respiratory health in Grand Tunis. We have chosen to quantify this relationship from the biometeorological indicators and absolute thresholds of meteorological stress, specific Tunisian climate, and air quality to predict episodes at risk for respiratory health and thresholds of weather variables and air quality resulting in excess hospital admissions for respiratory causes. And this from the climate extremes of the parameters affecting the respiratory health : temperature, relative humidity and maximum wind speed. We, too, set realistic standards for air quality, relative to O₃ and PM₁₀, identifying critical thresholds excess hospitalizations in Grand Tunis and can be applied throughout the country. Given the effect of some climatic parameters on the dispersion of pollutants in the atmosphere, we also studied the relationship between climatic parameters and pollutants of O₃ and PM₁₀.

The results of this study reveal that, throughout the year, Tunisians are confronted with at least an environmental risk : photochemical pollution and heat waves, which are very responsive during the hot season ; during the cold season, it is the risk of cold and particulate pollution; and during the off-season, biological pollution, together with pollen, is more at risk. However, short-term exposure to these risks, the worsening of the respiratory illness or irritation of the respiratory system is real.

This study showed that the development and worsening of respiratory diseases appear to result from a complex interplay of individual and environmental factors. They are mainly in relation to time, air quality and atopy. The importance of these factors varies the respective disease. Moreover, the low socioeconomic status of the family increases the likelihood of being exposed to more of these risk factors. Added to this are behavioral factors such as alcohol, active and passive smoking.

Keywords : Grand-Tunis, Ozone, PM₁₀, respiratory illness, asthma, extreme weather, biometeorological threshold, weather type, risk factors.



 **erci !**



Mes remerciements très vifs aux professeurs Latifa HENIA et Gérard BELTRANDO qui m'ont donné la chance de réaliser cette thèse en cotutelle entre l'Université de Tunis et l'Université de Paris Diderot. Je suis très reconnaissante au professeur Latifa HENIA, de l'Université de Tunis, pour la confiance, la patience et l'encouragement dont elle m'a entouré. Je la remercie sincèrement pour ses conseils et sa disponibilité du début à la fin de la thèse. Je dédie ce travail respectueusement à la mémoire du professeur Gérard BELTRANDO, de l'Université de Paris Diderot, qui nous a quittés très tôt. Il m'a appris beaucoup de choses durant des années, ses conseils si précieux, ses encouragements et son constant soutien tout au long de mon travail et de mes voyages à Paris, m'ont beaucoup aidée. Ce fut un plaisir et un grand honneur de travailler sous sa direction. Paix à son âme!

Et suite au drame de la perte du Prof. BELTRANDO, Mme Malika MADELIN s'est chargée de suivre l'encadrement de mon travail du côté français. Elle m'a apporté sa vision complémentaire du travail. Qu'elle me permette de lui témoigner ma sincère et profonde gratitude pour son aide, ses motivations et son soutien même avant la direction de la thèse. J'aimerais remercier Mr. Le professeur Taoufik EL MELKI pour ses conseils et ses explications qui m'ont beaucoup aidé dans le développement de mes idées. J'adresse mes remerciements aussi, à Mr. Zouhaier HLAOUI pour ses qualités humaines et ses conseils précieux. Il a eu la gentillesse de nous aider pour effectuer nos visites de terrain.

Ma reconnaissance s'adresse également à tous mes professeurs de la Faculté des Lettres des Arts et des Humanités de la Manouba pour m'avoir guidé tout au long de mon cursus universitaire. Un grand merci au Prof. BEN BOUBAKER, mon directeur de mémoire de master, qui m'a guidé dans mes premiers pas dans le domaine de la recherche. Merci aussi au Prof. GAMMAR pour sa gentillesse et de m'avoir accueilli dans l'unité de recherche BiCADE. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Ce travail en cotutelle n'aurait pu avoir lieu sans le financement accordé par Campus France, l'unité de recherche GREVACHOT de l'Université de Tunis, l'Ecole Doctorale de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis et l'unité de recherche PRODIG de l'Université Paris Diderot. Ce financement m'a également permis de présenter mes résultats dans les colloques de l'AIC. Dans le même cadre, je souhaiterais remercier Mr. Abdelkarim DAOUD, professeur à la faculté de Sfax de sa collaboration qui a contribué à faciliter nos déplacements pour des séjours scientifiques à Paris.

Réaliser cette thèse n'a jamais été possible sans une base de données. Mes remerciements vont à l'ensemble du personnel du centre des urgences de Ben Arous et particulièrement Dr. MOUGUEÏDA et Dr. BOUHAJJA (chef de service) pour m'avoir accueillie et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Durant six mois ils ont fait un questionnaire à chaque patient admis pour asthme aux urgences de Ben Arous. Merci infiniment !

Je suis reconnaissante également à Dr. BORSALI FALFOUL (chef de service) et tout le personnel des urgences La Rabta, médecins et infirmiers, de m'avoir accueillie dans le service. Ils m'ont préparé toutes les conditions pour la collecte des données. Je remercie particulièrement Dr. MGANNEM et Dr DOGHRI. Par la même occasion, j'adresse aussi mes sincères remerciements à Dr. EL BEJI (chef de service) et tout le personnel du service de pneumologie à l'hôpital La Rabta qui ont accepté de collaborer avec moi. Ils ont mis l'archive à ma disposition et m'ont bien accueillie dans le service. Merci également à Dr. GHDIRA, chef de service de pneumologie et allergologie à l'hôpital Abderrahmen Mami, pour son aide et ses conseils.

Je tiens à remercier les personnels du Ministère de Transport, spécifiquement, Mme GMATI et Mr. FRAJ (directeur de la flotte et la navigation maritime) pour les données portant sur le transport en Tunisie. Un grand merci à Mr KALLEL, chef de service de l'agence technique des transports terrestres (ATTT) pour les données sur le trafic automobile dans le Grand-Tunis. Merci également, aux personnels de l'ANPE pour les données de la qualité de l'air, je remercie particulièrement Mr. KCHICH pour son accueil chaleureux lors de notre visite à la station d'El Mourouj.

C'est avec une certaine émotion que je voudrais remercier tous les membres de l'UMR PRODIG à Paris Diderot, auquel ma thèse est intégrée. Je n'oublierai jamais l'ambiance agréable du laboratoire et la gentillesse de mes collègues. J'ai passé des moments agréables avec eux, ils m'ont encouragé dans mon travail et étaient très généreux dans les conseils.

Je veux remercier de tout mon cœur Mr. BEN ABDALLAH qui m'a soutenu, aidé et encouragé, un grand merci du fond du cœur !

Merci aux membres de jury qui ont bien voulu examiner et juger ce travail.

Pour n'oublier personne, un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, par les données, les conseils, le soutien et l'encouragement.

Il est indispensable de remercier ma famille, qui m'a toujours encouragé et soutenu. Je dédie ce travail à mes parents qui ont tout fait pour ma réussite et que j'aime plus que tout au monde ;

Mes sœurs et mon frère ;

Mes nièces, Asma, Alaa, Oswa et mon neveu Youssef ;

A ma grand-mère Khira ;

A la mémoire de ma grand-mère Aïcha, qui nous a quittés avant l'achèvement de cette thèse. Paix à son âme !

A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Safa



Sommaire

Partie I : Cadre spatial, données et approches méthodologiques.....	19
Chapitre I : Présentation du Grand-Tunis.....	20
Chapitre II : Facteurs de risque associés aux maladies de l'appareil respiratoire	29
Chapitre III : Données de base et méthodes	42
Chapitre IV : Facteurs de risque météorologiques.....	51
Partie II : Situation météorologique, temps et pollution de l'air dans le Grand-Tunis.....	77
Chapitre V : Pollution atmosphérique dans le Grand-Tunis : sources, réglementations et stations de mesure	78
Chapitre VI : Variabilité spatiale et temporelle des polluants d'ozone et des particules en suspension dans le Grand-Tunis	107
Chapitre VII : Épisodes photochimiques et types de temps dans le Grand-Tunis	120
Chapitre VIII : Épisodes de pollution aux PM10 et type de temps dans le Grand-Tunis ..	141
Partie III : Santé respiratoire, situations atmosphériques à risque et impact de la pollution de l'air	158
Chapitre IX : Mise en évidence d'un indicateur et de seuils prédictifs d'un impact sanitaire respiratoire.....	159
Chapitre X : Les consultations externes à la Rabta : variabilité des pathologies respiratoires et impact du climat.....	164
Chapitre XI : Les effets des conditions climatiques et des polluants atmosphériques sur les admissions hospitalières aux urgences La Rabta.....	173
Chapitre XII : Crises d'asthme : climat, type de temps et pollution de l'air.....	227
Chapitre XIII : Les facteurs de risque environnementaux pour la santé respiratoire et la particularité de l'allergie dans le Grand-Tunis.....	275
Conclusion générale.....	295
Références bibliographiques.....	301
Bases de données en ligne	313
Table des figures	315
Table des tableaux.....	325
Table des matières	332
Annexes.....	336

Liste des abréviations

ANPE : Agence Nationale de Protection de l'Environnement

ATTT : Agence Tunisienne du Transport Terrestre

AUGT : Agence Urbaine du Grand-Tunis

AIC : Association Internationale de Climatologie

BiCADE : Biogéographie, Climatologie Appliquée et Dynamique Erosive

BPCO : Broncho pneumopathie chronique obstructive

C : Centile

CAT : Les Cimenteries Artificiel Tunisiens

(C1, C2) : Indicateur basé sur les variables météorologiques du même jour

(C1', C2') : Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur deux jours

(C1", C2") : Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur trois jours

GCT : Groupe Chimique Tunisien

COV : composés organiques volatils

DDB : Dilatation des Bronches

DGPC : Direction générale des ponts et chaussées

EP : Embolie pulmonaire

EPA : Agence de Protection de l'Environnement

Fig : Figure

GREVACHOT : Variabilité du Climat et l'Homme en Tunisie

h : Heure

ha : Hectare

hPa : Hectopascal

INGREF : Institut national de la recherche en génie rural, eaux et forêts.

INM : Institut National de la Météorologie

INS : Institut National de Statistique

IRE : Indice de refroidissement éolien

ISSEP : Institut de Sport et de l'Education Physique

km : Kilomètre

m : Mètre

Max : Maximale

MEHT : Ministère de l'équipement, de l'habitat et de l'aménagement du territoire
Min : Minimale
nm: Nanomètre
NO : Monoxyde d'azote
NO₂ : Dioxyde d'azote
NO_x : Oxydes d'azote
O : Oxygène monoatomique
O₃ : Ozone troposphérique
OMM : Organisation Météorologique Mondiale
OMMP : Office de la Marine Marchande
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
OTC : Oasis Technical Corporation
P : Percentile
PCN : Poste central National
PFE : Mémoire de fin d'étude
PM : Les particules en suspension
PM10 : Les particules en suspension de tailles inférieures à 10 microns
PRODIG : Pôle de Recherche pour l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique
REA : Service de réanimation
RN : Route Nationale
RNSQA : Réseau National de Surveillance de la Qualité de l'Air
s : Seconde
SAM : Système d'acquisition des données
SFBT : Société de Fabrication des boissons de Tunisie
SNT : La société tunisienne de transport
SICOAC : Société Industrielle des Conduites et Accessoires
SO₂ : Dioxyde de soufre
T : Température
Tab : Tableau
THI : Température Humidity Index
Tmin : Température minimale
Tmax : Température maximale
TN : Température minimale
TU : Temps Universel

TX : Température maximale

UHP : Unité d'Hospitalisation Polypathologique

UOCD : Unité d'observation de courte durée

UV : Ultra-violet

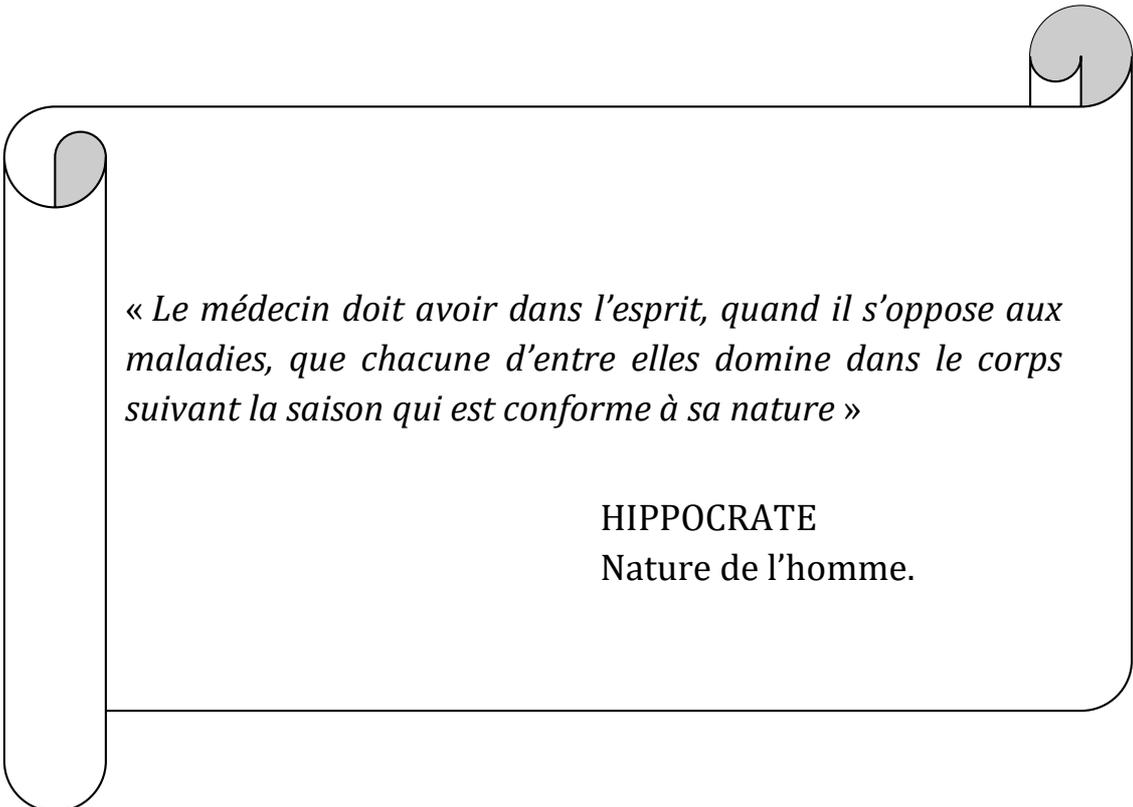
ZI : Zone Industrielle

λ : Lambda, 11^{ème} lettre de l'alphabet grec

°C : Degré Celsius

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: Micro gramme par mètre cube

% : Pourcent



« Le médecin doit avoir dans l'esprit, quand il s'oppose aux maladies, que chacune d'entre elles domine dans le corps suivant la saison qui est conforme à sa nature »

HIPPOCRATE
Nature de l'homme.

Introduction générale

Environnement... l'enjeu sanitaire

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a défini la santé comme étant, « *un état complet de bien-être physique, mental et social et ne consiste pas seulement en l'absence de maladie ou d'infirmité* » (OMS, 1946). Cette définition donne à la santé un concept large influencé par de nombreux déterminants. Nombreux sont, en effet, les facteurs autres que sanitaires qui, directement ou indirectement, influent sur la santé des individus et des populations tels que les facteurs démographiques, socio-économiques, environnementaux, géographiques, climatiques et météorologiques, ... La santé n'est donc pas sous la dépendance exclusive de l'action médicale ou du secteur de la santé. L'apport des autres facteurs est aussi d'une importance capitale.

En 1995, Gary Taubes publiait dans la revue « Science », un article de synthèse illustré par des propos d'épidémiologistes et biostatisticiens renommés, intitulé « *L'épidémiologie se confronte à des limites* » et qui marqua la communauté des épidémiologistes. Il y indiquait que le champ de l'épidémiologie est désormais celui de la mise en évidence de faibles effets sur l'état de santé des populations de divers facteurs liés aux modes de vie et à l'environnement.

En effet, un lien étroit existe entre l'état de l'environnement et l'état de la santé humaine. Pour désigner ce lien, on parle de « santé environnementale ». C'est seulement, depuis les années 1990 que les scientifiques sont en mesure de démontrer clairement l'existence de ce lien grâce à des études épidémiologiques et aux nouveaux moyens techniques qui permettent de mesurer des effets dans le temps de l'accumulation de petites quantités toxiques (Chauveau, 2008).

Les influences des mécanismes climatiques sur la santé sont très étendues également, notamment les épisodes météorologiques extrêmes appelés aussi paroxysmes climatiques (vagues de chaleur ou de froid), qui ont des impacts directs et indirects sur la santé des populations. La surmortalité durant les épisodes de canicule, les épisodes d'empoisonnement au monoxyde de carbone, la propagation de la grippe, les accidents de la circulation causés par le brouillard ou encore les crises d'asthme ont ceci de commun que les conditions météorologiques et /ou climatiques, qui constituent un facteur plus ou moins influent voire déclencheur du problème sanitaire. Bien que les enjeux de santé liés aux conditions climatiques ne sont évidemment pas les mêmes en fonction de la zone climatique dans laquelle on se trouve, ils ont pourtant en commun de dépasser le simple traitement des pathologies liées *stricto sensu* au climat qui est plus souvent un facteur qu'une cause de maladie (Heinlein, 2011).

L'appareil respiratoire constitue une voie d'exposition privilégiée aux agressions en rapport avec l'environnement. De nombreuses pathologies pulmonaires sont directement liées à l'inhalation d'aéro-contaminants en suspension dans l'atmosphère (Aubier *et al.*, 2009). Aujourd'hui, selon certaines estimations reprises par l'OMS (2014), 25 à 33 % des maladies dans le monde seraient dues à des facteurs environnementaux

en relation avec le climat et/ou la pollution atmosphérique. Trois millions de personnes meurent chaque année sous l'effet de la pollution atmosphérique, soit 5 % des 55 millions de décès annuels dans le monde. En Tunisie, les maladies respiratoires représentent 11,2 % des mortalités soit 2502 décès en 2009. De ce fait, elles constituent la troisième cause de mortalité après les maladies du système circulatoire (28,9 %) et les tumeurs malignes (16,1%) (Ministère de la Santé, 2014).

Risques et vulnérabilités

« *Ils ne meurent pas tous, mais tous étaient frappés* » raconte La Fontaine dans sa fable « *Les animaux malades de la peste* » (La Fontaine). On pourrait en dire de même de la météo et de la pollution atmosphérique, qui touchent tous les individus. Toutes les personnes exposées ne sont pas affectées au même degré, la notion de sensibilité individuelle apparaît alors ! Le caractère « sensible » est défini comme la propriété d'un être vivant ou d'un organe d'être informé des modifications du milieu extérieur ou intérieur et d'y réagir par des sensations (De Cotret, 2006). La sensibilité d'une personne correspond à une prédisposition, à une réactivité voire à une vulnérabilité vis-à-vis de certains stimuli. Ainsi se distinguent certains groupes d'individus dont la fragilité et la sensibilité les prédisposent davantage à l'impact de la météo et des polluants atmosphériques. Pour le climat, ces différents groupes sont constitués de ceux qui vivent seuls, malades ou grabataires, ceux qui prennent à doses excessives des « neuroleptiques » ou des médicaments à effets « anticholinergique », le sexe féminin, l'âge élevé ainsi que les individus de faibles niveaux socio-économiques, habitant des logements mal ventilés et non climatisés (Besancenot, 2001 ; Laaidi *et al.*, 2009). Les sujets à plus haut risque face à la pollution atmosphérique sont les jeunes enfants, les personnes âgées, les fumeurs, les personnes qui sont en contact avec des substances toxiques dans le cadre de leur profession, et les personnes malades du cœur ou des poumons (Ducimetiere, 2011). En bonne santé, l'individu ne sent d'effets directs qu'à de très forts taux de pollution. Tandis que pour les personnes sensibles, les dommages sont plus immédiats.

En effet, les principaux facteurs de vulnérabilité aux maladies respiratoires proviennent de l'âge (aux deux extrêmes de la vie), de la précarité du statut économique et, jusqu'à un certain point, le fait d'habiter une grande ville, rajoute Besancenot (2015). Dans les grandes agglomérations, bien que les citoyens ont souvent accès à un dispositif de soins de meilleure qualité qu'ailleurs, ils subissent au plus haut point les méfaits des périodes caniculaires et enregistrent alors les plus fortes surmortalités à cause de l'îlot de chaleur urbain (Laaidi *et al.*, 2009 ; Besancenot, 2015).

Principaux repères historiques sur la santé environnementale

L'intérêt porté aujourd'hui à la « santé environnementale » renoue avec l'entichement des médias pour les questions d'environnement, l'émergence de mouvements écologistes et la répétition des crises sociéto-environnementales, à une époque où les catastrophes et les pandémies annoncées ne cessent de se multiplier et d'être médiatisées. Ces préoccupations sanitaires étaient déjà présentes au V^{ème} siècle avant J-C lorsque Hippocrate écrivait : « *N'ignorez pas ce qui touche à l'état du temps, car tout ce qui le concerne est étroitement lié à la médecine* ». Quant aux aspects politiques et réglementaires de la pollution de l'air, au VI^{ème} siècle après J-C, dans le corpus « Juris

Cicilis » de l'empereur romain Justinien, on trouve la règle de droit « *Aerem corrumpere non licet* » (il n'est pas permis d'altérer l'air) (in Martin et Maystre, 1998).

En Grande-Bretagne, la prise de conscience des nuisances de la fumée et du besoin de la contrôler a une longue histoire. En 1273, le fait de brûler du charbon fut interdit par ordonnance à Londres. Edward II ordonna de punir de torture la personne prise en train de souiller l'air avec des fumées de charbon et en 1306, un artificier fut exécuté pour l'avoir fait (Martin et Maystre, 1998). Plus tard, en 1763, Le Begne de Presles, médecin de Jean-Jacques Rousseau décrit la pollution atmosphérique à Paris en France, par : « *Paris a une atmosphère particulière en tout temps, excepté pendant les grands vents. Cette atmosphère est formée par un air rendu très pesant par la quantité de corpuscules ou exhalaisons qu'il soutient et que leur poids empêche de s'élever fort haut : c'est ce que forme le nuage dont Paris paraît couvert et enveloppé dans le temps le plus serein lorsque l'on regarde la ville d'un peu loin. Les brouillards que l'on éprouve si souvent à Paris pendant l'automne et l'hiver qui ont si mauvaise odeur, qui font mal aux yeux, à la gorge, excitent la toux, causent des fluxions...* » (Tuddenham, 2011). C'est véritablement au XIX^{ème} siècle que les épisodes de pollution massifs et récurrents apparaissent dans les villes de la révolution industrielle, principalement dues à l'utilisation croissante du charbon et du fioul (Beltrando, 2014).

Si l'Homme a essayé de contrôler la pollution atmosphérique, le risque du climat reste supérieur à son pouvoir. Depuis Hippocrate, l'homme attribue au climat une bonne part de ses ennuis de santé. De telles accusations ont longtemps reposé sur la seule intuition, mais de multiples travaux confirment aujourd'hui qu'à travers ses métamorphoses de chaque jour, le temps qu'il fait joue un rôle dans la survenue de nombreuses maladies aiguës et dans l'évolution de diverses affections chroniques (Besancenot, 1997). Le climat peut indifféremment agir comme véritable facteur causal, comme facteur précipitant ou comme simple facteur déclenchant de l'indisposition, de la maladie ou de l'accident. Les risques climatopathologiques sont nombreux. Certains sont le fait presque exclusif des facteurs mésologiques, d'autres font conjointement intervenir la vulnérabilité des individus face à une agression climatique (Besancenot, 1995).

L'impact du climat sur la santé n'a guère besoin d'être explicite en présence de paroxysme météorologique de grande ampleur. Les mécanismes physiologiques déclenchés par le froid mettent en jeu les systèmes nerveux, endocrinien, cardiaque et respiratoire. Lorsque la température diminue, il s'ensuit une vasoconstriction et une augmentation du cholestérol, du fibrinogène et de la viscosité sanguine (Laaidi *et al.*, 2009).

Les influences pathogènes des climats sur l'organisme sont étudiées par la climatopathologie, appelée aussi la biométéorologie humaine (ou bioclimatologie) « *qui étudie l'influence du climat sur l'organisme humain* » (Beltrando et Chémery, 1995). Le paramètre météorologique pertinent pour mesurer l'impact du froid est bien sûr la température de l'air, mais celle-ci ne tient pas compte des échanges thermiques entre l'air et le corps. Pour cela, différents indices ont été construits.

Exemples marquants dans l'histoire des grands épisodes météorologiques et de pollution de l'air

Certaines circonstances météorologiques et catastrophes collectives, qui ont marqué l'histoire récente, en relation avec le climat et la pollution de l'air, méritent d'être mentionnées vu leurs effets dramatiques sur la santé humaine.

Une histoire climatique mouvementée

L'histoire du climat est émaillée de nombreux épisodes climatiques dont les plus significatifs de ces dernières décennies peuvent être ainsi résumés :

- En juillet 1987, en Grèce, une canicule a entraîné 4093 décès, deux fois plus que la normale. Des décès classés comme liés à la chaleur, avec une température qui atteignait 43,6°C à Athènes (Giles *et al.*, 1990) ;
- En juillet 1995, une vague de chaleur à Chicago, aux États-Unis, a causé 525 décès (12 pour 100 000 habitants) et 3 300 admissions excédentaires aux urgences. 72 décès ont été enregistrés par jour, ce qui représente 150 % de la normale. Les morgues étaient pleines et les corps ont dû être stockés dans des camions réfrigérés. Du 12 au 20 juillet, les températures quotidiennes moyennes sont variées de 34 à 40°C (Dematte *et al.*, 1998) ;
- En 2003, la France a connu une canicule exceptionnelle par sa durée (deux semaines), son intensité et son extension géographique. Elle a causé un grand nombre de décès estimé à près de 56 000. Au mois d'août, il y a eu environ 15 000 décès supplémentaires par rapport à la mortalité attendue en France métropolitaine pour cette période. Dans le reste de l'Europe, 70 000 décès ont été recensés pendant les trois premières semaines d'août (Hémon et Jouglu, 2003). À la suite de cette hécatombe dramatique, plusieurs études et rapports ont vu le jour pour cerner l'origine d'un tel désastre. En France, chaque été, un plan canicule est mis en place pour informer et protéger les personnes à risque et se préparer à la gestion d'une éventuelle nouvelle crise sanitaire.

Une vague de chaleur peut faire penser à une déshydratation ou à une défaillance de thermorégulation (hyperthermie, coup de chaleur) vue les personnes en question. Mais, la surmortalité a aussi été largement alimentée par les pathologies respiratoires (Valleron, 2006).

Le froid intense peut aussi constituer un danger. Les journées froides peuvent être accompagnées de vents violents et de chutes de neige parfois soudaines :

- Lors de l'hiver 1985, une vague de froid a frappé l'Europe durant plusieurs jours. Le 3 janvier, le nord-est de la France a reçu ce grand froid. Ce dernier s'est ensuite déplacé sur le reste du territoire et il a stagné jusqu'au 17 janvier. Lors de ce grand froid accompagné de neige, on a enregistré une température -17°C à Toulouse ou encore 22°C à Nevers. À la suite de cette vague de froid, 150 personnes trouvèrent la mort en France (Météo France, 2015) ;
- En février 2008, en Afghanistan, l'hiver le plus rigoureux des 40 dernières années a coûté la vie à plus de 800 personnes (afghana.org) ;
- Le 2 février 2012, après six jours, la vague de froid qui a frappé l'Ukraine a fait 43 morts. Les corps de la plupart des victimes (28) sont découverts en pleine rue. À Kiev, les températures dégringolent à -23°C (risque.gouv.fr, 2014).

Les vagues de froid ne sont pas des événements rares en Tunisie et leurs effets sur la population ne sont pas négligeables. Les plus récentes vagues de froid ont touché la Tunisie durant la première quinzaine de février 2012. Elles ont fait 11 décès à cause du froid. Le niveau des chutes de neige d'une rare intensité a atteint deux mètres pour la ville d'Aïn Draham qui a enregistré à elle seule 7 décès et 74 hospitalisés (La Presse.tn, 2012). Selon l'INM (l'Institut National de la Météorologie), des températures jusqu'à -4°C ont été enregistrées dans les régions du nord-ouest (INM, 2012).

Ces vagues de froid peuvent aussi toucher le Sahara au sud de la Tunisie, par exemple en février 2012, les dunes se sont retrouvées avec une couche blanche qui avait couvert les dunes jaunes d'habitudes (Fig. 1). Mais ce phénomène est très rare dans une région à climat saharien.



Figure 1 : La neige dans le Sahara tunisien, autour de la ville de Nefta, février 2012.
(Source : *blog-voyage.tn*, 2015).

Ainsi, les extrêmes thermiques sont la cause de troubles majeurs, de surmortalité et d'hospitalisations. D'autres paramètres climatiques influencent aussi la santé de l'homme notamment le vent. Ce dernier possède toutes sortes de caractéristiques que la médecine traditionnelle chinoise, à force d'observation, les a associées à divers états pathologiques. Selon sa direction, le vent peut apporter des masses d'air froid, chaud, sec ou humide. Il charrie aussi des particules de toute sorte (Giovanni, 1992).

Les catastrophes liées à la pollution atmosphérique

Le premier épisode de pollution atmosphérique, qui ait été bien documenté quant à ses causes et conséquences sur la santé, eut lieu entre le 1^{er} et le 5 décembre 1930 dans la vallée de la Meuse en Belgique. Trois jours de temps anticycloniques avec inversion de température, ont entraîné l'accumulation d'un épais brouillard dans la vallée encaissée de la Meuse, lieu de nombreuses industries : cokeries, hauts-fourneaux, aciéries, centrales électriques, verreries, usines de chaux, de zinc, d'acide sulfurique et d'engrais artificiels (Zimmer, 2014). Les conditions météorologiques défavorables ont empêché la dispersion des polluants (aérosols, gaz irritants en particulier le dioxyde de soufre SO₂). La population a souffert de troubles respiratoires sérieux et on a déploré une

soixantaine de morts en deux jours, ce qui représentait plus de dix fois la mortalité normale (Nemery *et al.*, 2001).

Le premier accident de pollution mortelle, décrit aux États-Unis, est probablement celui qui a eu lieu à Donora, en Pennsylvanie, entre le 27 et le 30 octobre 1948, dans une vallée industrielle. La pollution, causée par une inversion anticyclonique intense, était si importante que beaucoup de résidents ont dû évacuer la ville. Avec une vingtaine de morts, le taux de mortalité était de plus de six fois la norme pour la région (Davis, 2000 ; Nemery *et al.*, 2001).

Malgré les catastrophes de la Meuse et de Donora, la pollution atmosphérique n'a pris une place importante dans la vie sociale qu'à partir des années 1950. En effet, cette période a été marquée par une série d'épisodes majeurs de pollution de l'air, qui est par conséquent, considérée comme le véritable début de la recherche et des interventions en matière de pollution urbaine.

En décembre 1952, un épisode de pollution a causé 4000 décès à Londres. À cette époque, le pays était en pleine révolution industrielle. La combustion effrénée de charbon avait créé un fort taux de pollution et la ville était fréquemment envahie par le « smog », un mélange de fumée de charbon (*smoke*) et de brouillard (*fog*). Le smog peut se révéler mortel pour toute personne ayant une fragilité de l'appareil respiratoire. Les nombres de décès par bronchite et par pneumonie (pathologies respiratoires) ont été, respectivement, huit et trois fois plus fréquents au cours de l'épisode. À l'époque, les niveaux moyens des particules en suspension mesurés à Londres étaient de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et au moment de l'épisode du « *Big Smoke* » les concentrations ont atteint les 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Bell et Davis, 2001) (Fig. 2).



Figure 2 : Londres, pendant l'épisode de « smog », décembre 1952. (Sources : BBC, news.bbc.co.uk).

Si la catastrophe londonienne a été l'initial accident qui a relancé l'intérêt pour la pollution atmosphérique, celle de Seveso en 1976, marqua davantage les esprits. Elle apparaît même comme une des pierres angulaires de la prise de conscience écologique à plus vaste échelle. Le samedi 10 juillet 1976, à l'usine ICMESA de Meda, jouxtant la ville de Seveso, en Lombardie au nord de l'Italie, une cuve du réacteur de trichlorophénol explosa. La pression, due à une température excessive (230°C) de la vapeur stagnant dans les conduites, combinée avec l'arrêt du mélangeur avant l'achèvement du cycle, provoqua la rupture d'une valve de sécurité sur le disque de fermeture. Un nuage

composé d'hydroxyde de sodium, de polyéthylène glycol, de soude caustique ainsi que de deux kilos de dioxine s'échappa. Selon les différentes études, la quantité estimée de dioxine rejetée dans l'atmosphère fut comprise entre 0,2 et 40 kg. Les conséquences sur la santé se traduisirent essentiellement par des cas de brûlures chimiques de la peau. Un taux anormal de décès dus à des problèmes respiratoires et cardio-vasculaires est enregistré dans la population atteinte (Baccarelli *et al.*, 2008 ; Centemeri, 2009) (Fig. 3).

Le 24 juin 1982, le Conseil Européen adopte ainsi la « directive Seveso », dont les principes sont la protection de la population et de l'environnement, et justifie une surveillance particulière de certaines activités industrielles susceptibles de causer des accidents majeurs, et la prise par l'industriel de toutes les mesures de protection nécessaires.



Figure 3 : Incendie de l'usine chimique de Seveso (Italie), le 10 juillet 1976. (Source : *rebellyon.info*).

Les pays très industrialisés sont les plus concernés par les risques industriels et technologiques. Les pays du Sud ne sont toutefois pas épargnés par ces risques. Ceux-ci y prennent même plus d'ampleur et font davantage de victimes car les normes de sécurité y sont en effet souvent peu élaborées comme ce fût le cas de l'accident de Bhopal.

La ville de Bhopal, située au centre de l'Inde, a ainsi connu l'une des plus grandes catastrophes industrielles de l'histoire. Dans la nuit du 2 au 3 décembre 1984, une explosion a eu lieu dans l'usine de pesticides de l'Union Carbide, firme multinationale américaine établie à Bhopal. Cette explosion a été provoquée par une fuite accidentelle d'eau dans un réservoir de stockage de isocyanate de méthyle. Un nuage de quarante tonnes de gaz toxique mortel a alors gagné l'atmosphère et est retombé pendant deux heures sur Bhopal (Fig. 4).



Figure 4 : L'usine d'Union Carbide à Bhopal (Inde). (Source : *lepoint.fr*, 2014).

Cette pollution chimique a immédiatement fait de très nombreuses victimes, principalement installées dans les bidonvilles situés près de l'usine. 2000 à 3000 personnes auraient été tuées par le gaz toxique dans la seule journée du 4 décembre 1984. Au total, le nombre de victimes serait compris entre 15000 et 30000 personnes. Le bilan humain de la catastrophe est en effet impossible à dresser avec exactitude en raison de la pauvreté de la population touchée. En outre, près de 550000 habitants auraient été affectés à différents degrés par le gaz toxique (Pandley et Bowonder, 1993).

Les conséquences sanitaires du plus grave accident industriel de l'histoire sont importantes. Des dizaines de milliers de victimes souffrent de nombreuses maladies : troubles respiratoires, malformations, maladies gynécologiques ou cancers (Hrouda, 1984 ; *ina.fr*, 2014) (Fig. 5).

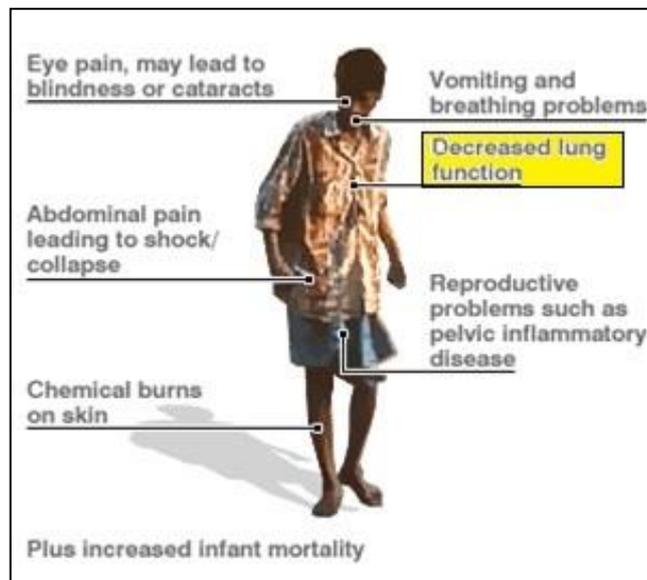


Figure 5 : Les conséquences de la pollution sur le corps humain, spécifiquement sur l'appareil respiratoire (decreased lung function = diminution de la fonction pulmonaire). (Source : *US Environmental Protection Agency*, 2015).

De nos jours, la pollution atmosphérique prend des proportions effrayantes en Chine. Dans ce pays, la pollution de l'air est responsable de la mort de 1,6 million de personnes par an, soit 4000 par jour (Goudet, 2015). Le 9 novembre 2015, les médias internationaux parlaient d'une vague d' "Airpocalypse" en Chine. Plusieurs métropoles et régions du nord-est du pays enregistraient de redoutables pics de pollution atmosphérique, avec par endroits une densité de particules nocives 50 fois supérieure au plafond recommandé par l'OMS. Des pics de particules de 2,5 microns de diamètre PM(2.5), dépassant $1400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été enregistrés dans certains quartiers de la ville de Shenyang (Fig. 6). De tels niveaux figurent parmi les plus élevés jamais relevés et rendus publics à travers le pays (l'OMS recommande un plafond moyen de seulement $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par 24h). Ces microparticules sont accusées d'être impliquées dans des centaines de milliers de décès prématurés en Chine. La pollution est exacerbée par l'utilisation accrue de charbon pour le chauffage et la production d'électricité durant l'hiver. Mais le brouillard dont souffrait Pékin provient essentiellement des provinces alentour, où les concentrations de particules polluantes restaient, ce jour-là (le 9 novembre 2015) à des niveaux très élevés (Garric, 2015).



Figure 6 : La pollution atmosphérique à Changchun en Chine, le 9 novembre 2015.
(Source : *lemonde.fr*)

L'essentiel de la pollution atmosphérique de Chine provient des usines à charbon mais aussi, les voitures sont également responsables de cette pollution monumentale. L'agglomération de Pékin compte 800 000 habitants de plus par an et plus de 4 millions de véhicules circulent chaque jour dans la ville (maxisciences.com, 2014).

Mexico est l'une des capitales du monde les plus polluées aussi. Son problème est aggravé par le fait que la ville est située à près de 2300 mètres d'altitude et est entourée de montagnes. Son air épais et ses vallées en forme de bol concentrent les polluants à l'intérieur de la ville (Fig. 7).



Figure 7: La pollution atmosphérique à Mexico (Mexique). (Source : *Geography Blog, 2015*).

En Tunisie, depuis des années, la qualité de l'air connaît quelques dégradations dans les villes qui abritent de grandes unités industrielles et dans les villes qui connaissent un trafic routier intense. Le classement des régions les plus polluées en Tunisie donne Gabès en première position. Elle est talonnée par le Grand-Tunis, Bizerte, Sfax et Sousse...

À Gabès, au sud-est tunisien, l'implantation du complexe chimique de traitement des phosphates le « Groupe Chimique Tunisien » (GCT), a généré divers problèmes de pollution de la faune, la flore et la population, et cela depuis le début de son activité en 1972 (Fig. 8). Cancers, asthmes et ostéoporoses minent la santé de trois cent mille personnes à cause des déchets de phospho-gypse (GEREP-Environnement, 2007).



Figure 8 : Gabès, la nuit. (Source : *nawaat.org, 2015*).

Malgré les plaintes quasi-générales de la population, les autorités tunisiennes sont rassurantes : « *pas de pollution* » ! Le Ministère de l'Environnement tunisien défend le complexe chimique et insiste sur le fait que les normes tunisiennes sont actualisées et enrichies. Selon un médecin, membre de la commission régionale de la santé et de la sécurité professionnelle : « *les autorités évitent de mener une étude sérieuse du phénomène parce qu'elles craignent l'opinion nationale et internationale* » (nawaat.org, 2015). De ce fait, aucune étude officielle ne peut donner les statistiques exactes sur les dégâts causés par la pollution à Gabès.

L'air à l'intérieur serait encore plus nocif qu'à l'extérieur

Si nous faisons attention à l'air que nous respirons à l'extérieur, surtout dans les grandes villes et les zones polluées, néanmoins, nous ignorons que les lieux dans lesquels nous passons 85 % de notre temps (appartement, bureau, école, voiture...) sont parfois plus pollués !

Revêtements (peinture, moquettes, rideaux, panneaux de bois agglomérés) dégagent des polluants spécifiques et toxiques (composés organiques volatils (COV), formaldéhyde, éthers de glycol...), les produits d'entretien ménagers, les aérosols, les vapeurs de cuisine, les appareils de chauffage et les fumées de tabac libèrent des émanations qui peuvent être nocives. Enfin des acariens et des moisissures qui se développent en présence d'humidité sont aussi des sources de pollution (Aubier *et al.*, 2009).

La pollution de l'air intérieur, est suspectée de développer et d'aggraver divers problèmes respiratoires notamment l'asthme, la rhinite allergique et la bronchite chronique ainsi que des intoxications aiguës et même des cancers (Aubier *et al.*, 2009). Reste que, le risque réel que posent les contaminants intérieurs varie selon l'importance et la durée de l'exposition, ainsi que selon la sensibilité de la personne. En effet, comme pour la pollution extérieure, les personnes les plus vulnérables à la mauvaise qualité de l'air intérieur sont les très jeunes enfants, les personnes âgées, celles dont le système immunitaire est affaibli ainsi que les personnes asthmatiques et allergiques.

Cette pollution domestique a donné lieu à de nombreuses études scientifiques. Plusieurs d'entre elles révèlent que l'air intérieur est le plus souvent plus pollué que l'air extérieur : 2 à 5 fois plus élevée selon l'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) américaine (2013). Selon une étude de « l'observatoire de la qualité de l'air intérieur », 9 % des logements français présentent des concentrations très élevées de produits chimiques (Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 2015). Mais les pays les plus affectés se situent en Asie du Sud-est et dans le pacifique occidental (3,3 millions de décès pour la pollution intérieure contre 2,6 millions pour l'extérieure). Les régions à plus faibles revenus sont les plus touchées. Les femmes et les enfants dans ces pays paient un lourd tribut à la pollution de l'air intérieur. Ils passent plus de temps à la maison à respirer les fumées et la suie que dégagent les fourneaux à bois ou à charbon mal ventilés (OMS, 2015).

Des conséquences majeures prouvées sur la santé

Diverses études réalisées ont montré l'existence d'un lien entre les maladies respiratoires et les polluants présents dans l'air. En 2007, aux Pays-Bas, une étude épidémiologique a été effectuée sur la pollution liée aux gaz d'échappement des automobiles et ses effets néfastes sur la santé des enfants. Plus de 4000 enfants ont été

suivis de la naissance à 4 ans. L'étude a mesuré, pour chacun des enfants, l'exposition à ces polluants. Ce calcul de l'exposition individuel s'est basé sur la mesure de particules fines d'oxyde nitreux (NO₂). Les résultats de l'enquête sont effrayants sur l'homme : la pollution automobile favorise les infections respiratoires, les signes de l'asthme et d'allergie chez les jeunes enfants. Le risque d'avoir de l'asthme est majoré de 30 % par rapport à celui d'un enfant non exposé. Pour les autres affections, le risque est augmenté de 20 % (Alibeu, 2007). La relation causale avec le cancer broncho-pulmonaire semble aussi établie. Les particules diesel sont d'ailleurs classées par le centre international de recherche sur le cancer comme « carcinogènes probable » depuis environ une vingtaine d'années (Charpin et Palot, 2009). Néanmoins, ce classement a été effectué sur la base d'études expérimentales mettant en œuvre de très fortes doses ; des expositions à des doses inférieures à 600 µg/m³ (plus de 15 fois la valeur limite en vigueur) n'augmenteraient pas le risque de cancer chez le rat (Marano, 2004).

La relation de causalité de l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé a été établie aussi par la démonstration de la « preuve contraire ». Une équipe suisse a pu montrer que la diminution des concentrations en polluants urbains entraîne une stabilisation des paramètres spirométriques, tandis que ces derniers continuent à se dégrader dans le cas contraire (Downs *et al.*, 2007).

De ce fait, la pollution atmosphérique, extérieure comme intérieure, partout dans le monde, a été reconnue un facteur de risque pour la santé des populations et de la qualité de vie (Fig. 9). D'où l'émergence, dans les pays développés, d'une nouvelle forme de médecine : « la médecine environnementale », où l'environnement est au cœur des préoccupations médicales et est donc pris en compte du point de vue clinique et biologique, non seulement pour l'établissement du diagnostic mais aussi pour la mise en œuvre de nouveaux traitements.

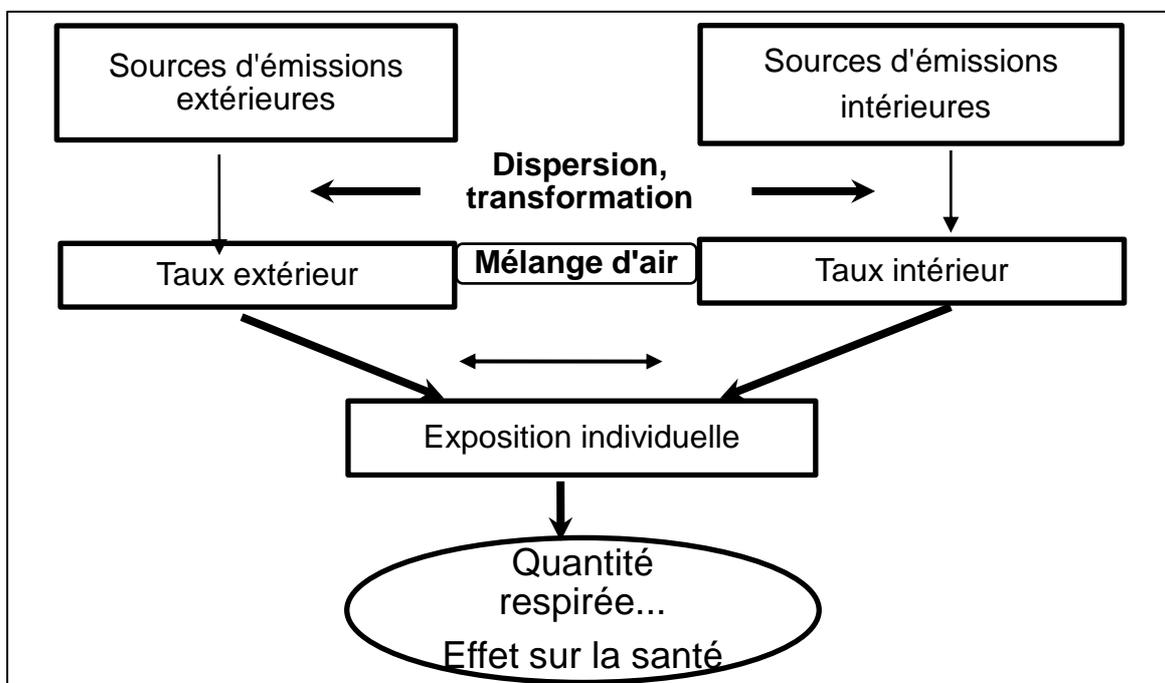


Figure 1 : Schéma d'évaluation de l'exposition au risque sanitaire d'un polluant. (Beltrando, 2014).

Dans ces pays occidentaux, la population est plus exigeante en matière du confort et du bien-être. Néanmoins, les pays pauvres (quel que soit l'euphémisme utilisé pour les qualifier, émergents, en voie de développement,...) (Fleuret, 2007) dans leur très grande majorité ne disposent pas de réel système de santé et les enjeux sanitaires pour leur population sont d'un ordre bien différent des pays occidentaux.

D'autres études aussi ont permis de mesurer l'importance en santé publique, en termes sanitaires et économiques, des impacts de la pollution. Ce sont des études dites « d'intervention », qui ont été utiles également pour argumenter des décisions réglementaires visant à réduire les niveaux de pollution, que ce soit la mise en œuvre d'une loi, la modification d'un plan d'urbanisme ou de transports (Abaldi *et al.*, 1999 ; Friedman *et al.*, 2001) ou mesurer le coût des effets de la pollution sur la santé (Hémon et Jouglu, 2003 ; Nerhagen *et al.*, 2008). Ces études ont pris un caractère essentiellement technique révélant une prédominance des non-géographes dans ce domaine. La contribution des géographes et notamment des climatologues est donc d'une importance capitale.

Effets direct et indirect du changement climatique sur la santé respiratoire

Le réchauffement climatique est un défi majeur auquel la communauté internationale est confrontée. En Tunisie, les études d'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique ont démontré que le pays subit déjà l'impact de ce phénomène planétaire, en particulier les impacts liés à l'augmentation des températures comme aggraver le stress hydrique et accentuer la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes (ALCOR-TEC, 2011). Les épisodes de chaleur intense sont, déjà, fréquents dans le climat de La Tunisie et risquent de s'accroître avec les changements climatiques. Et ces grandes chaleurs peuvent entraîner des répercussions plus ou moins graves sur la santé, voire des décès très majoritairement d'origine respiratoire (Laaidi *et al.*, 2009).

Les effets sanitaires indirects du changement climatique se manifestent par la dégradation de la qualité de l'air. En effet, les changements climatiques contribuent probablement à une augmentation de la pollution atmosphérique par l'augmentation de la concentration en particules fines et en ozone, des polluants très délétères sur la santé respiratoire. Le surcroît du rayonnement solaire pourra allonger la saison estivale où sévissent de forts niveaux d'ozone troposphérique ce qui peut majorer l'intensité des pics photochimiques. Quant à la pollution particulaire, elle est susceptible de diminuer faiblement en hiver, mais d'augmenter fortement en été. À cause du réchauffement climatique, une recrudescence printanière et/ou estivale des allergies respiratoires et des crises d'asthme est à craindre à la suite de la pollution atmosphérique mais à cause, aussi de l'augmentation atmosphérique en pollens (Besancenot, 2015).

Les études académiques tunisiennes antérieures

De nombreuses enquêtes épidémiologiques sont très régulièrement publiées dans la littérature scientifique internationale. En Tunisie, les recherches portant surtout sur la bioclimatologie humaine ne cessent de se développer. Elles visent à définir l'éventail des conditions climatiques dans lesquelles un individu peut éprouver une sensation de confort à partir des approches qui se contentaient de l'étude des processus physiologiques entre l'Homme et son environnement selon des indices bioclimatiques.

Dans ce sens, nous citons, la thèse de Tahar Alouane (2002) en arabe, intitulée « Les ambiances bioclimatiques dans les principales régions touristiques de la Tunisie » qui revêt une importance particulière par son approche largement synthétique. Nous citons également :

- Le mémoire de master de Mejri. W (2007) : Climat et allergies respiratoires à Tunis ;
- La thèse de Jarraya. M (2009) : Biométéorologie de la morbidité cardiovasculaire et respiratoire dans le secteur public à Sfax ;
- La thèse de Lahmar. L (2014) : Climat et maladies respiratoires et cardiovasculaires à Sousse et Kairouan.

Nous citons aussi, le mémoire de fin d'étude (PFE) de Kortli. M (2009), qui a essayé d'étudier l'effet du changement climatique sur la santé à partir de la relation des vagues de chaleur sur la mortalité en Tunisie.

Pour la relation entre le climat et la pollution atmosphérique, nous mentionnons :

- Le mémoire de DEA de Slama. M (1998) : L'influence des paramètres climatiques sur la pollution de l'air à Tunis.
- Belguith-Megdiche. I (1999) : Etude physico-chimique des aérosols atmosphériques en milieu urbain côtier : cas de la région de Sfax influence des conditions météorologiques locales et synoptiques.
- La thèse de Dahech. S (2007) : Le vent à Sfax (Tunisie), impact sur le climat et la pollution atmosphérique.

Au-delà de ces mémoires en thèses et masters, ces auteurs ont également publié des articles qui seront cités dans cette thèse dans les chapitres concernés.

D'autres études, intéressantes existent également, sur le climat et la pollution atmosphérique mais ne dépassent pas le cadre d'un article, se présentent souvent dans les revues scientifiques. Nous mentionnons essentiellement les travaux de Taoufik El Melki qui a analysé la réaction entre la pollution de l'air et le climat dans tous ses aspects. Parmi les articles, citons à titre d'exemple :

- Conditions atmosphériques ambiantes et variation spatiotemporelle de la pollution dans le Grand-Tunis (2008 A) ;
- Les situations atmosphériques stables, un type particulier d'extrêmes climatiques : cas de surconcentrations d'ozone à Tunis. (2009) ;
- Brises du littoral et variation des concentrations polluées dans le Grand-Tunis : cas des banlieues de La Manouba et d'El Ghazela (2010).

Concernant l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé, plusieurs études se sont intéressées essentiellement aux caractéristiques physico-chimiques de la pollution et ses impacts environnementaux notamment sur les végétaux. Mais rares sont les études qui ont abordé les effets de cette pollution environnementale sur la santé de l'être humain. Parmi ces études, la thèse en médecine de Mourad Abdennadher (1994), intitulée « Effets respiratoires de la pollution atmosphérique dans deux quartiers populaires de Tunis, enquête en milieu scolaire ». Dans 76 pages, cette thèse s'est intéressée aux effets respiratoires de la pollution atmosphérique chez des élèves résidant dans la zone polluée de Mégrine et leurs homologues résidant dans la zone peu

polluée (Cité Ibn Khaldoun). Les résultats ont révélé un excès de morbidité respiratoire à Mégrine en rapport avec le niveau de la pollution atmosphérique.

Les études académiques sur l'impact des deux paramètres environnementaux climat et pollution atmosphérique sur la santé humaine sont rares en Tunisie et ne concernent que le secteur médical. Nous citons essentiellement les thèses de :

- Kalboussi. H (2008) : Affections cardiovasculaires, climat et pollution atmosphérique : à propos d'une enquête épidémiologique réalisée dans la région de Sousse.

- Bouhlel. N (2009) : Relation à court terme entre le climat, la pollution atmosphérique et les affections respiratoires aiguës.

- Bettaieb. J (2010) : Impact de la chaleur et la pollution atmosphérique sur la mortalité dans la ville de Tunis (2005-2007).

Cet intérêt porté à la bioclimatologie m'a paru intéressant. Mais l'étude d'un seul irritant, qui est le climat, reste incomplète et non subjective, en l'absence des autres influents majeurs sur la santé notamment la pollution atmosphérique et le niveau socio-économique. C'est dans ce cadre de l'importance du phénomène et de la rareté des études que s'intègre notre choix du sujet de thèse : **Effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé respiratoire à Tunis.**

Le Grand-Tunis : un espace d'étude typique

Notre espace d'étude est le Grand-Tunis, qui constitue, avec ses quelques deux millions et demi d'habitants, soit la plus grande concentration urbaine de la Tunisie et son premier pôle industriel. À la différence des autres régions polluées du pays, dans le Grand-Tunis, à côté de la pollution industrielle, la pollution provient aussi de l'automobile, qui représente environ 40 % du parc national (El Melki, 2008 B). La pollution automobile est à l'origine d'une forte pollution primaire de proximité du trafic. Le Grand-Tunis constitue aussi un important foyer de la pollution biologique au pollen, et cela en raison de la proximité des espaces agricoles périphériques et riches en espèces végétales qui ont un fort pouvoir allergisant (El Gharbi *et al.*, 1976).

Rappelons dans ce cadre que le climat du Grand-Tunis est méditerranéen à nuance semi-aride, avec une forte insolation propice à la formation du polluant chimique, l'O₃. Les conditions météorologiques ambiantes sont souvent stables : les situations anticycloniques persistent surtout en hiver, les situations de marais barométriques dominant en été (Hénia, 1998) et les inversions thermiques sont fréquentes en toutes saisons (El Melki, 2007). Ces facteurs sont favorables à la concentration des polluants primaires et secondaires, favorisée par des caractéristiques topographiques du site. Un site très ouvert sur la mer et encadré par un amphithéâtre de collines assez élevées l'entourant en croissant, ce qui réduit la ventilation et contribue largement à la formation des surconcentrations polluées (El Melki, 2008 B).

Notre choix du Grand-Tunis est mentionné aussi, par la multiplicité des centres de services sanitaires spécialisés dans la pneumologie, par comparaison au reste du pays. D'ailleurs, on y trouve l'unique hôpital spécialisé dans les maladies respiratoires et allergiques en Tunisie : l'hôpital Abderrahman Mami.

De ce fait, toutes les caractéristiques sont réunies dans le Grand-Tunis pour la réalisation de notre projet de thèse.

Problématique et choix de la période d'étude

Notre approche consiste, à mettre en relation les trois catégories de données, portant sur le climat, la pollution et les pathologies respiratoires dans le but de déterminer les meilleurs indicateurs environnementaux pour la santé respiratoire de la population à Tunis du 1^{er} janvier 2005 au 31 décembre 2011. Cette période de 7 ans est la période la plus récente au moment où nous avons commencé cette thèse et nous la jugeons suffisante pour l'étude des effets du climat et de la pollution atmosphérique sur la santé humaine notamment la santé respiratoire. Ce choix s'explique aussi par la période où les données disponibles sont plus fiables et plus complètes, notamment pour les données cliniques. Cette période est marquée par des situations climatiques remarquables. Elle englobe une année exceptionnellement froide en Tunisie, 2005, et une année très chaude à l'échelle internationale et tunisienne, 2009. Cette dernière est classée au cinquième rang des années les plus chaudes depuis environ 1850, lorsque débutèrent les relevés instrumentaux (OMM, 2010). Ce qui n'est pas sans effet sur la santé respiratoire.

L'étude de la relation entre la qualité de l'air et la santé respiratoire se heurte à de nombreux problèmes méthodologiques. Certains, généraux, concernent le milieu urbain, d'autres sont spécifiques aux polluants atmosphériques. Ainsi, dans une grande agglomération comme celle du Grand-Tunis, toute la population est exposée à la pollution de l'air et l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé est difficile à appréhender pour plusieurs raisons :

- l'exposition à la pollution de l'air est hétérogène dans le temps et dans l'espace : elle dépend notamment des lieux fréquentés par l'individu et ses activités ;
- en outre, l'effet dose varie selon le type de polluant ;
- l'état de santé et les antécédents pathologiques, qui peuvent modifier la sensibilité vis-à-vis de la pollution atmosphérique, sont différents pour chaque individu ;
- les pathologies susceptibles d'être liées à la pollution atmosphérique sont multifactorielles, c'est-à-dire que la pollution atmosphérique n'est qu'un des facteurs qui contribuent à leur apparition.

Dans notre recherche, il nous était impossible de mettre en œuvre les approches épidémiologiques classiques comparant la fréquence des maladies ou des décès chez des groupes exposés et non exposés, ou la fréquence de l'exposition chez des malades et des témoins. Et cela faute de temps et de moyens.

Le choix aussi des polluants adéquat à étudier est très important en particulier dans un environnement regorgeant de polluants présents en concentrations suffisantes pour causer un malaise respiratoire. De ce fait, les polluants qui nous intéressent dans ce contexte sont les particules en suspension (PM) et l'ozone (O₃). D'après les données de la littérature, les particules en suspension forment le polluant le plus souvent associé à différents effets sanitaires. Aux États-Unis, par exemple, les particules en suspension sont le polluant pour lequel il existe le plus de capteurs de mesure, et il est très étudié (Annesi-Maesano et Dab, 2006). L'ensemble des études épidémiologiques sur l'impact des particules fournit des résultats d'une grande cohérence. Une augmentation des teneurs en particules a été associée, à court terme (quelques jours), à un excès de surmortalité, notamment cardiorespiratoire, d'hospitalisation pour maladie respiratoire, d'aggravation de l'asthme, de symptômes respiratoires durant plus

longtemps, d'une altération de la fonction pulmonaire et d'incapacité (Zeka *et al.*, 2005). À l'inverse, une réduction des teneurs est associée à une amélioration des indicateurs. L'O₃ est l'autre polluant qui suscite actuellement beaucoup d'intérêt et d'inquiétudes, en raison de la multiplication des épisodes d'été de pollution photochimique. À court terme, chez l'homme sain, l'exposition à l'O₃ durant quelques minutes à quelques heures, à partir de 100 µg/m³, provoque une diminution de la fonction pulmonaire, un accroissement de la résistance des bronches et une réaction inflammatoire (Annesi-Masano et Dab, 2006).

La relation entre la météo et la santé est largement décrite dans la littérature aussi. La majorité de ces études sont basées sur des systèmes d'alerte, fondés sur une surmortalité après une vague de froid ou de chaleur. Des systèmes conçus pour permettre d'alerter les autorités publiques avant la survenue possible d'un phénomène épidémique de grande ampleur en rapport avec une vague de chaleur ou de froid. Et cela, à partir des seuils basés essentiellement sur la température comme le cas en France où l'alerte doit être trois jours avant une vague de froid ou de chaleur (Laaidi *et al.*, 2009). Au Canada, l'indice de refroidissement éolien (IRE) est diffusé à la population par « Environnement Canada » depuis 1970. Il est accompagné de conseils de comportement. L'objectif principal est d'éviter les gelures liées à la baisse de l'indice de refroidissement éolien (Bustinza *et al.*, 2010 ; Martel *et al.*, 2010). Aux États-Unis, le *Centre for Disease Control* diffuse sur son site internet des conseils de comportement pour lutter contre le froid à l'extérieur et à l'intérieur (chauffage), et des kits de survie pour la maison et les voitures. L'objectif est la promotion de la santé et de la sécurité des personnes. Au Royaume-Uni, les avertissements concernent les personnes pratiquant une activité en plein air, pour lesquelles il est considéré que le risque d'hypothermie est accru lorsque la température de refroidissement éolien est inférieure à -10°C (Laaidi *et al.*, 2009).

Le but du présent travail était de recourir à des données locales afin de voir s'il était possible d'identifier des indicateurs et des seuils mieux adaptés à la réalité tunisoise. Nous savons, en effet, que la réponse des populations aux effets environnementaux et météorologiques essentiellement, varie considérablement d'un endroit à l'autre. À cause de l'acclimatation aux conditions locales propres à chaque population, on ne peut pas simplement utiliser un seuil dérivé empiriquement dans une autre ville ou région ; il n'existe pas de seuil universel reconnu au-delà duquel les impacts sanitaires comme l'excès d'hospitalisation ou de mortalité apparaissent.

La question des risques pour la santé de la pollution atmosphérique ou du climat se résume souvent à l'impact des pics de ces facteurs environnementaux. De ce fait, deux approches sont à suivre dans cette thèse. D'une part, les pics des situations avec les admissions hospitalières dans le Grand-Tunis. D'autre part, nous allons intégrer les paramètres climatiques et ressortir les types de temps récurrent en période des pics. Nous allons opter pour une approche quantitative (analyse statistique) et une approche qualitative (analyse graphique). En premier lieu, il s'agit de mettre en relation les éléments climatiques ou météorologiques d'une part, et les données de la pollution atmosphérique d'autre part. En deuxième lieu, nous allons analyser les relations entre les paramètres climatiques, les plus affectants sur la santé respiratoire, et les admissions hospitalières ainsi que les relations entre les polluants atmosphériques et les admissions hospitalières. Nous visons à identifier des indicateurs de stress climatique extrême pour prévoir des épisodes à risque pour la santé respiratoire. Nous déterminerons aussi les niveaux de pollution prédictifs d'impacts sanitaires significatifs

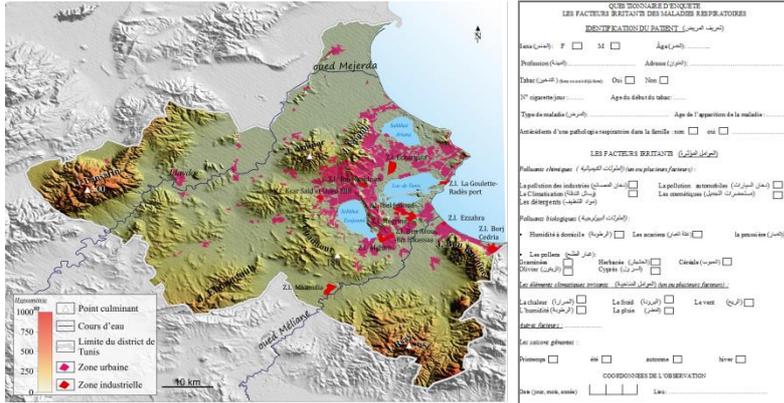
et qui pourront être utilisés pour déclencher des interventions préventives. Nous avons également intégré d'autres facteurs explicatifs (les facteurs génétiques, contexte socio-économique...). Nous avons essayé d'approfondir cette question par la variation des sources des données cliniques et par un questionnaire qui aborde les données démographiques, le niveau socioéconomique ainsi que le niveau d'éducation du patient.

Le manuscrit est constitué de trois parties :

La première partie sera consacrée au contexte de l'étude, elle est composée de quatre chapitres. Le premier, présente le Grand-Tunis comme région d'étude, ses caractéristiques géographiques, démographiques et l'infrastructure sanitaire. Ce volet permet de comprendre les caractéristiques et l'importance du site de l'étude. Le second, porte sur les facteurs de risque associés aux maladies de l'appareil respiratoire. Les sources et la qualité des données ainsi que les méthodes d'approche seront présentées dans le troisième chapitre. Et le quatrième chapitre sera consacré aux facteurs de risque méthodologique.

La seconde partie s'intéresse à l'étude de la relation du climat et des polluants atmosphériques. Elle se compose de trois chapitres. Le premier présente la pollution atmosphérique, les polluants utilisés et les normes de la qualité de l'air en Tunisie et ceux recommandés par l'OMS. Le deuxième et le troisième chapitre analysent les dépassements des normes tunisiennes, respectivement pour l'O₃ et les PM10.

La troisième et dernière partie est intitulée « Santé respiratoire, situations atmosphériques à risque et impacts de la pollution de l'air ». Elle porte sur l'analyse des admissions hospitalières en relation avec les paramètres météorologiques et la pollution atmosphérique. Elle se compose de quatre chapitres : le premier s'intéresse à la recherche des indicateurs biométéorologiques et seuils prédictifs d'un impact sanitaire respiratoire, le deuxième aux consultations externes à l'hôpital La Rabta, le suivant aux admissions hospitalières à La Rabta, le quatrième aux crises d'asthme aux urgences de Ben Arous, le cinquième et le dernier aux risques des facteurs environnementaux et la particularité des allergies respiratoires.



Partie I

Cadre spatial, données et approches méthodologiques

La première partie de ce travail est une partie introductive, elle est constituée de quatre chapitres. Le premier chapitre exposera le cadre géographique dans lequel est effectué ce travail. Les connaissances bibliographiques en termes de climat, pollution atmosphérique et risque sanitaire ainsi que la présentation des pathologies respiratoires seront exposées dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre s'attachera à présenter les différents types de données utilisées. Dans l'exposé de la méthodologie (quatrième chapitre), la question est de savoir quels sont les paramètres météorologiques susceptibles d'accroître la morbidité respiratoire? Quels seuils biométéorologiques seront spécifiques pour les pathologies respiratoires pour le climat du Grand-Tunis ?

Chapitre I : Présentation du Grand-Tunis

Dans ce chapitre, nous nous référons à de nombreuses sources bibliographiques pour présenter le cadre spatial de ce travail de thèse : principalement les caractéristiques topographiques, démographiques ainsi que l'infrastructure sanitaire du Grand-Tunis.

I. 1. CADRE GEOGRAPHIQUE DU GRAND-TUNIS

Dans ce qui suit, nous présentons les caractéristiques de chaque gouvernorat du Grand-Tunis, notamment la localisation, la superficie, l'urbanisation et l'économie. Ensuite nous présentons le cadre topographique du Grand-Tunis.

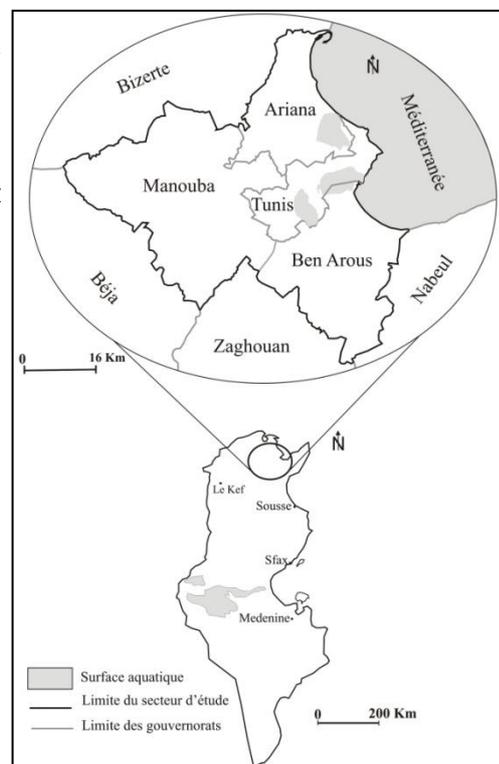
I. 1. 1. Le Grand-Tunis, la plus grande agglomération tunisienne

L'appellation « Tunis » s'applique au Grand-Tunis qui est l'association des quatre gouvernorats : Tunis, Ariana, Ben Arous et La Manouba (Fig. 10).

Le Grand Tunis se situe au nord-est de la Tunisie entre la latitude nord de $36^{\circ} 25'$ et $37^{\circ} 05'$ et la longitude est de $9^{\circ} 40'$ et $10^{\circ} 25'$. La superficie totale du district est de 215 000 ha, soit environ 2 % seulement de la superficie du pays. Durant les trente-cinq dernières années, le Grand-Tunis a connu une forte expansion spatiale. En effet, la surface urbanisée de l'agglomération est passée d'environ 10 000 ha en 1975 à près de 25 000 en 2010 (AUGT, 2010). Cette évolution dans la consommation de l'espace a été engendrée par l'accroissement démographique et par l'évolution du taux d'urbanisation. La population s'est accrue de 950 000 habitants en 1975 pour atteindre 2 450 000 habitants en 2013 (INS, 2013). Le Grand-Tunis est l'aire urbaine la plus peuplée de la Tunisie, soit environ 23 % de la population du pays.

Atteignant un taux d'urbanisation de 100 %, le gouvernorat de Tunis s'étend sur une surface qui s'élève à environ 28 800 ha et comporte à lui seul plus de 1 004 500 habitants en 2013. Le gouvernorat de Tunis se distingue par sa fonction de centre métropolitain : capitale politique et économique. De ce fait, il est le pôle d'emplois et d'activités le plus important et le plus dense du pays.

Figure 10 : Localisation géographique du Grand-Tunis.



Le gouvernorat de l'Ariana est situé à l'est du gouvernorat de La Manouba et au nord du gouvernorat de Tunis. Il est urbanisé à près de 91 %. En 2013, la population totale du gouvernorat est estimée à 540 400 habitants répartis sur une surface de 45 574 ha.

Le gouvernorat de Ben Arous est situé au sud du gouvernorat de Tunis, il est urbanisé à 90 %. Il se caractérise par ses activités industrielles. Sa surface s'étend sur quelque 67 724 ha pour une population estimée en 2013 à près de 616 000 habitants.

La Manouba est située à l'ouest du gouvernorat de l'Ariana et il est le gouvernorat le moins urbanisé du Grand Tunis. Le taux d'urbanisation qui s'élève à 74 % est l'une des traductions de l'importance de l'activité agricole dans ce gouvernorat. En 2013, sa population totale était de 379 900 habitants et sa surface est de 113 865 ha (Tab. 1 ; AUGT, 2010).

Tableau 1 : Superficie, nombre d'habitants et taux d'urbanisation par gouvernorat en 2013. (Source : INS, 2013).

Gouvernorat	Superficie (ha)	Nombre d'habitants	Densité de populations	Urbanisation (%)
Tunis	28 800	1 004 500	35	100
Ariana	45 574	540 400	12	91
Ben Arous	67 724	616 000	9	90
La Manouba	113 865	379 900	3	74
Total	214 968	2 449 900	11	-

I. 1. 2. Une topographie assez variée

Le Grand-Tunis est limité au nord par le gouvernorat de Bizerte, à l'ouest par le gouvernorat de Béja, au sud par le gouvernorat de Zaghuan, au sud-est par le gouvernorat de Nabeul et à l'est par la Méditerranée.

Le site possède un faible relief mais assez varié (Fig. 11) : à l'ouest, les plaines de Mornaguia et de Majerda, drainées par l'oued de Majerda, s'étalant autour de Sabkha¹ d'Essijoumi et Jbal Ammar. Au nord, les plaines de Soukra et d'Ariana s'étendent entre Jbal Ennahli, la sabkha de l'Ariana et le lac de Tunis. Au sud, les plaines de Morneg s'étendent autour du Jbal Boukornine et Jbal Rsass. Elles sont drainées par oued Meliane.

Le Grand-Tunis se caractérise par d'importantes surfaces permanentes en eau : le lac de Tunis (4000 ha) ou périodiquement inondées (sabkhaⁱ) notamment les deux sabkhas d'Essijoumi (3900 ha) et d'Ariana (5000 ha). Il est traversé aussi par le principal cours

¹ Sabkha : est un mot arabe, que l'on trouve en pays désertique ou presque est une dépression temporairement occupée par un lac, en général salé et où se déposent des évaporites. Les eaux proviennent du ruissellement, mais aussi des nappes phréatiques d'après le dictionnaire de géologie (Foucault et Raoult, 2001).

d'eau en Tunisie : Majerda. Ce dernier est le seul cours d'eau du pays qui soit alimenté de façon continue. L'eau converge vers la sabkha pendant la période pluvieuse de l'année (de septembre à avril), et en période estivale, elle tend à s'assécher, par suite d'une évaporation intense.

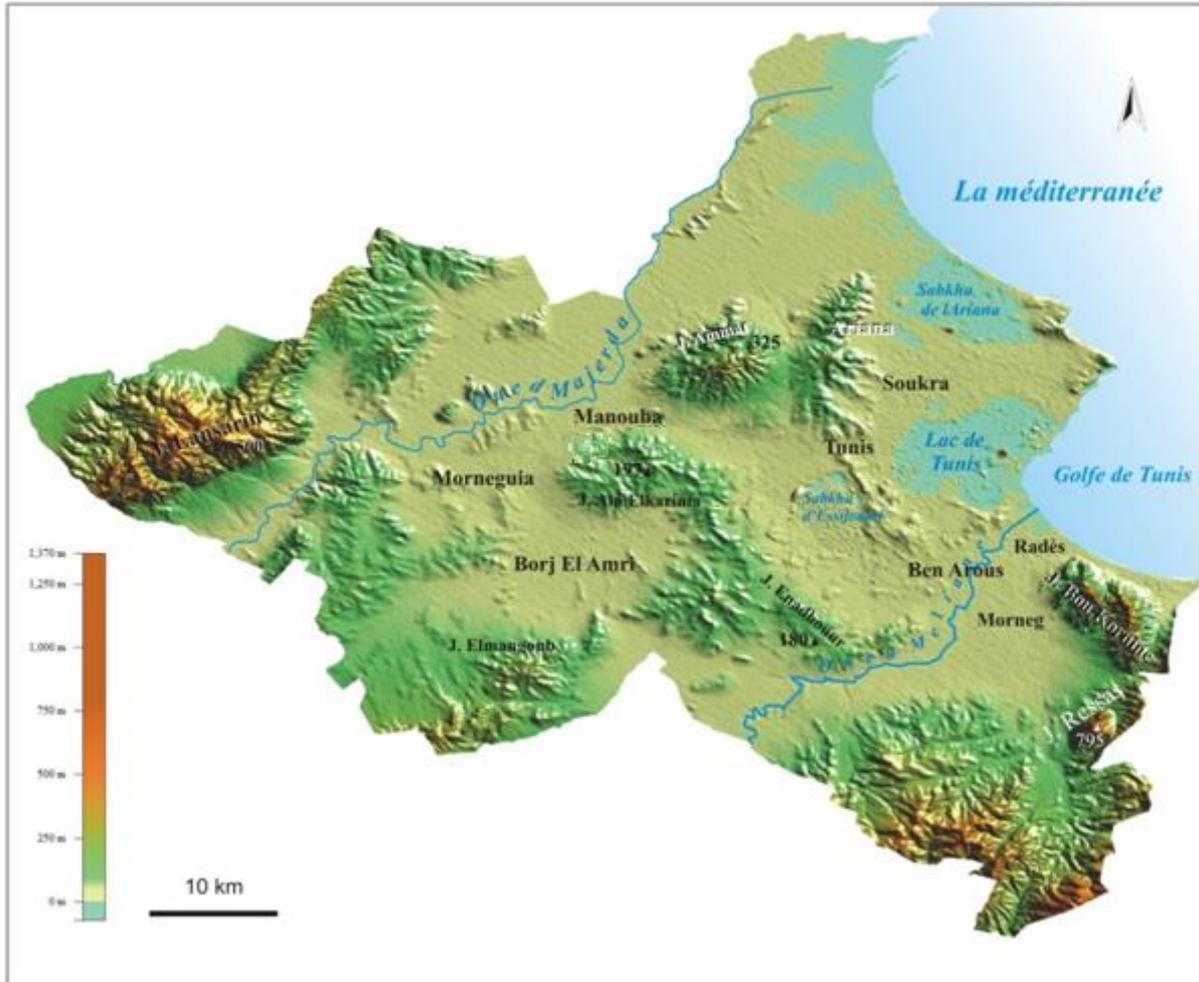


Figure 11 : Cadre géographique du Grand-Tunis. (Réalisation : Ben Romdhane S., à partir du fond topographique 1/200 000 de Tunis).

I. 1. 3. L'occupation du sol

Les gouvernorats du Grand-Tunis sont formés par des zones agricoles variées où sont pratiquées des agricultures pluviales, des cultures irriguées et dans lesquelles il y a aussi des domaines forestiers.

Toutefois, ce cadre naturel constitue une source naturelle de la pollution de l'air. La flore tunisienne est variée et très riche, elle comporte des milliers d'espèces de plantes qui libèrent d'énormes quantités de grains de pollen qui ont un fort pouvoir allergisant sur la santé de l'Homme (El Gharbi *et al.*, 1976).

Dans le Grand Tunis, il y a trois importants groupes végétaux en cause dans la réaction allergique : les arbres, les graminées et les herbacées (Tab. 2).

Tableau 2 : Les plantes allergisantes en Tunisie. (Source : El Gharbi et al., 1976).

Les arbres	Les graminées	Les herbacées
Bouleau	Chiendent	Plantain
Aulne	Pâturin	Pariétaire
Noisetier	Ivraie	Pissenlit
Cyprès	Dactyle	Marguerite
Châtaigner	Phléole	Oseille
Chêne	Avoine	Ortie
Frêne	Blé	
	Maïs	

I. 1.4. Une population jeune à majorité masculine

Plusieurs auteurs ont tenté d'analyser les facteurs influençant la consommation de soins de santé. Ceux-ci peuvent être tant d'ordre individuel (âge, sexe, état de santé, subjectif, physique), économique ou social (densité de médecins, organisation du système de santé...). Donc l'âge et le genre des patients constituent des facteurs explicatifs importants de la consommation de soins (Artoisenet et Delière 2006).

La structure de la population tunisoise est plutôt jeune. Les quatre gouvernorats présentent une répartition équivalente des tranches d'âges de la population et c'est les tranches d'âge de moins de 39 ans qui prédominent. Avec un pic de la tranche d'âge 20-29 ans. 9 % de la population dans le Grand-Tunis et 10,1 % de la population tunisienne totale est vieille (plus de 60 ans) (Fig. 12) ce qui peut être un facteur explicatif majeur du nombre des patients atteints par une pathologie respiratoire dans notre analyse clinique. Ces personnes âgées présentent souvent une pathologie chronique ou une poly-pathologie qui demande bien évidemment une prise en charge lourde.

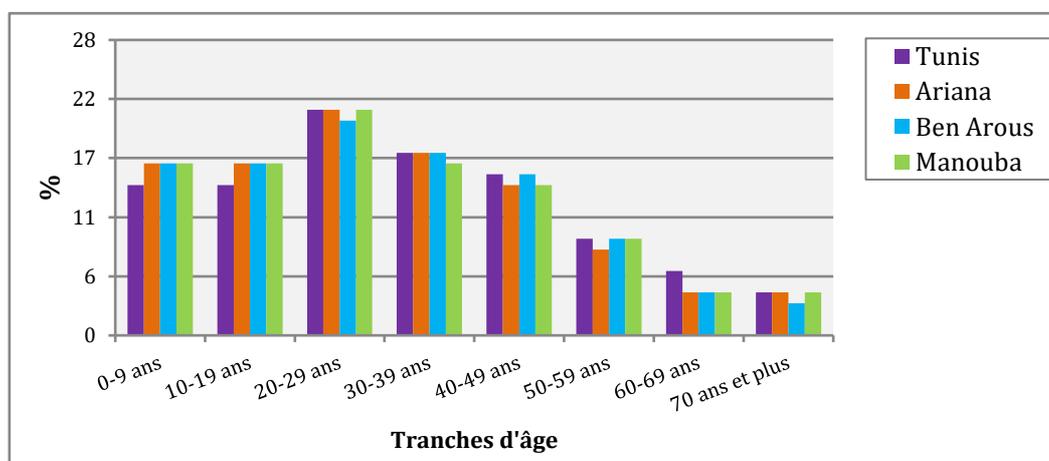


Figure 12 : Structure de la population par gouvernorat et tranche d'âge en 2004. (Source : INS, 2004).

En Tunisie le genre féminin domine, mais dans le Grand-Tunis, le nombre d'hommes (1 105 741) dépasse légèrement celui des femmes (1 142 051) (INS, 2011 ; Fig. 13). Les hommes pouvant être moins enclins à reconnaître la fréquentation d'un médecin (Artoisenet et Delière 2006). Dans la suite de notre étude, nous allons nier ou confirmer cet effet culturel.

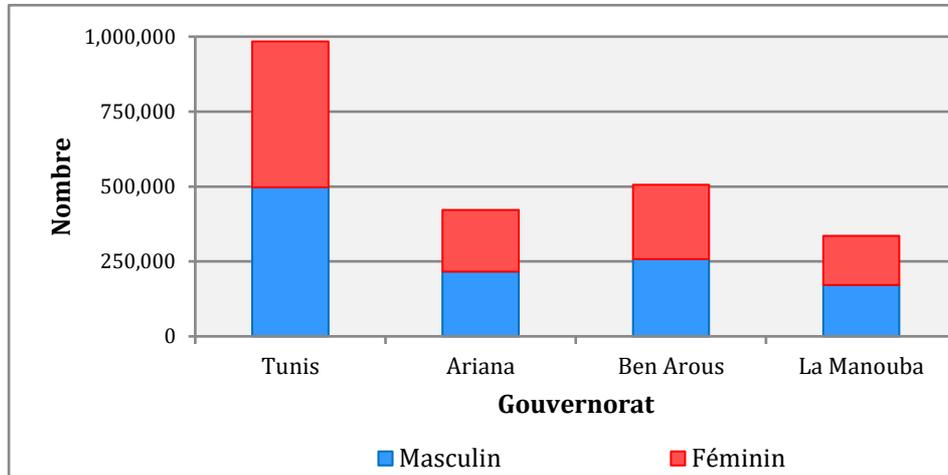


Figure 13 : Population selon le genre dans les gouvernorats du Grand-Tunis en 2011.
(Source : INS, 2011).

I. 2. L'INFRASTRUCTURE SANITAIRE DANS LE GRAND-TUNIS

Après la présentation du système de santé en Tunisie, nous présenterons la répartition des structures sanitaires fonctionnelles et les structures spécialisées en pneumologie afin d'identifier les zones défavorisées dans le Grand-Tunis.

I. 2. 1. Les types de composantes sanitaires en Tunisie

Le système de santé en Tunisie est constitué de deux principales composantes, une composante publique et une composante privée.

La composante publique est constituée des établissements dépendant directement du Ministère de la Santé publique. Elle est constituée de diverses catégories : hôpitaux universitaires, hôpitaux régionaux, hôpitaux de circonscription, centres de santé de base...

Les centres de santé de base, appelés aussi les « dispensaires », fournissent des consultations de médecine générale. Ils assurent les prestations sanitaires à caractère curatif (consultation curative polyvalente et spécifique aux malades chroniques, notamment l'hypertension artérielle et le diabète), préventif (suivi prénatal, vaccination, santé scolaire...) et éducatif. Généralement, les centres de santé de base assurent leurs prestations le jour, mais parfois aussi la nuit. Dans le Grand-Tunis, il y a 163 centres de santé de base (Tab. 3).

Tableau 3 : Nombre d'établissements médicaux par gouvernorat. (Source : Ministère de la Santé publique, 2013).

Gouvernorat	Centre de santé de base	Hôpital régional	Hôpitaux à vocation universitaire	Cliniques	Nombre de population par millier
Tunis	50	1	19	28	1005.5
Ben Arous	47	1	1	4	616.0
Ariana	24	1	1	3	540.4
Manouba	42	0	2	0	379.9
Total	163	3	23	35	2541.8

* : cliniques, sauf les centres privés d'imageries médicales.

Les hôpitaux régionaux constituent le premier niveau de référence pour les soins spécialisés. Ils assurent les prestations sanitaires curatives, préventives et éducatives relevant de la mission des centres de santé de base. Ils sont situés essentiellement dans les chefs-lieux des gouvernorats et dans certaines délégations de forte population.

Il y a trois grands hôpitaux régionaux dans le Grand-Tunis qui sont : l'hôpital Mahmoud Matri à L'Ariana, l'hôpital de Ben Arous dans le gouvernorat du même nom et l'hôpital Khair-Eddine à Tunis.

Les cliniques privées sont des sociétés commerciales. Dans la composante privée, nous comptons 35 cliniques dans le Grand Tunis, en 2014, qui représentent 43 % du total des cliniques privées de tout le pays (Tab. 3 et 4).

Tableau 4 : Nombre de cliniques (sans les centres privés d'imagerie médicale) par gouvernorat en 2014. (Source : INS, 2014).

Gouvernorat	Nombre de cliniques	Lits autorisés
Tunis	28	1484
Ariana	3	213
Ben Arous	4	138
La Manouba	0	0
Total	35	1835

I. 2. 2. Le soin des urgences

Le soin des urgences est une des filières du réseau de soins qui se positionne en front de la prise en charge des patients. En Tunisie, les urgences constituent une mission essentiellement publique, exercée par les établissements publics et privés dans 17 sites. Le service d'urgences reçoit chaque jour de l'année et 24h sur 24h toute personne se présentant spontanément ou sur prescription de leur médecin généraliste ou par moyen de secours, en attente de soins dans les différents domaines médicaux.

Une équipe pluridisciplinaire composée de médecins urgentistes, parfois de spécialistes ainsi que d'infirmiers et d'aides-soignants, est présente pour assurer une prise en charge de qualité dans les délais les plus courts. En fonction de l'état du patient et de sa pathologie, différentes unités de soins contribuent à l'hospitalisation en aval des urgences à l'hôpital : Unité d'Hospitalisation de Courte Durée (UHCD), Unité d'Hospitalisation Polypathologique (UHP), et services spécialisés dans le cadre de l'hospitalisation conventionnelle. L'admission du patient peut être directe lorsque l'état du malade impose sans délai des soins spécialisés (réanimation) ou si un lit est libre dans un service adapté à son état. En l'absence de disponibilités de lit sur le site ou de la spécialité dont dépend le patient, celui-ci devra être transféré dans un hôpital externe.

I. 2. 3. La pneumologie : une spécialité rare présentant une inégalité d'accès aux soins de santé

À Tunis, deux hôpitaux publics sont spécialisés dans la pneumologie : l'hôpital Charles Nicolle et l'hôpital La Rabta. En revanche, les établissements publics de santé des gouvernorats de Ben Arous et de La Manouba ne sont pas spécialisés dans cette branche.

Le gouvernorat de l'Ariana abrite un hôpital spécialisé en pneumologie : l'hôpital Abderrahmen Mami qui reçoit les malades souffrant de gênes respiratoires ou de problèmes respiratoires et cardiaques sérieux.

En matière d'offre de soins, les disparités géographiques sont très marquées entre les quatre gouvernorats. En effet, l'urbanisation influe directement sur l'accès aux soins. La population des gouvernorats les plus peuplés paraît plus béate que celle vivant notamment en milieu rural. Ces derniers éprouvent des difficultés pour pouvoir bénéficier des soins publics et plus encore des soins spécialisés. De ce fait, le gouvernorat de Tunis, le plus urbanisé, détient le plus grand nombre d'établissements sanitaires privés et publics ainsi que le nombre de lits, suivi de loin par les gouvernorats d'Ariana et de Ben Arous. Tandis que La Manouba, le plus vaste gouvernorat et le moins peuplé, n'abrite aucun établissement privé même s'il présente un nombre de lits dans le secteur public supérieur à celui de Ben Arous et de l'Ariana (Fig. 14).

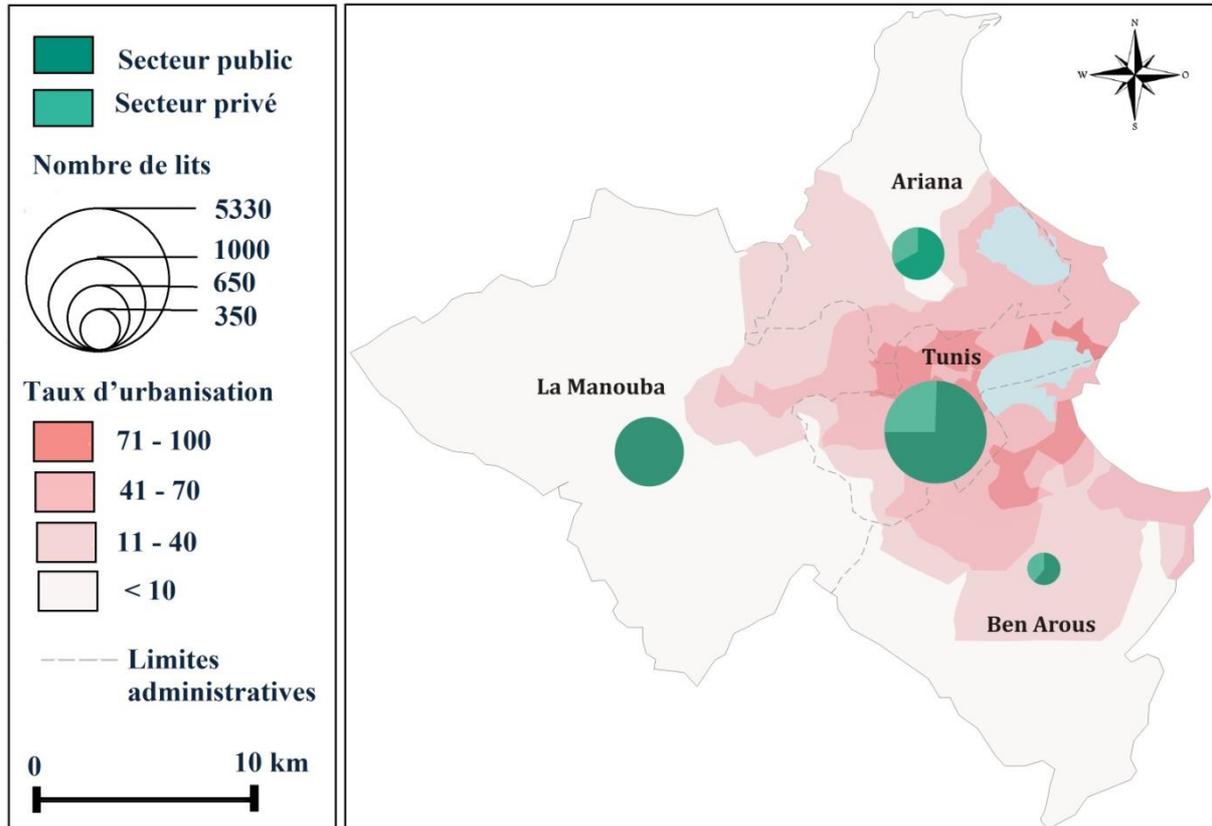


Figure 14 : Distribution du nombre et pourcentage des lits dans les secteurs publics et privés et taux d'urbanisation des gouvernorats du Grand Tunis en 2011. (Réalisation : Ben Romdhane S., Source des données : Ministère de la Santé publique, 2013).

CONCLUSION

La région du Grand-Tunis s'étend sur quatre gouvernorats : Tunis, l'Ariana, La Manouba et Ben Arous. Le site se caractérise par une topographie assez variée et d'importantes surfaces en eau ou périodiquement inondées. En dehors de la zone urbaine, le reste du territoire est essentiellement rural, avec une prédominance de cultures irriguées. Il s'étend de la vallée de La Majerda au nord, aux reliefs boisés de Jbal Boukornine et Jbal Rsass au sud.

Abritant la capitale politique et économique du pays, Tunis, Le Grand-Tunis est considéré comme le premier pôle économique, le plus grand centre d'emplois, la principale place financière ainsi que la plus grande concentration urbaine du pays avec deux millions et demi d'habitants.

Les disparités géographiques sont très marquées entre les quatre gouvernorats. Tunis est le gouvernorat le plus urbanisé, détient le plus grand nombre d'établissements sanitaires privés et publics dont deux hôpitaux publics spécialisés dans la pneumologie : l'hôpital Charles Nicolle et l'hôpital La Rabta. À l'inverse, La Manouba, le plus vaste gouvernorat et le moins peuplé, n'abrite aucun établissement privé avec absence de la spécialité de pneumologie dans le secteur public.

L'importance démographique et économique a engendré, certainement, un changement du mode de consommation des tunisois entraînant une augmentation des quantités ainsi qu'une diversification de la nature des déchets produits et donc une intensification de la pollution, notamment atmosphérique.

Chapitre II : Facteurs de risque associés aux maladies de l'appareil respiratoire

Le présent chapitre a pour but d'apporter une vision d'ensemble des questions touchant la santé respiratoire de l'homme face aux risques de l'environnement. Il commence par la présentation de l'appareil respiratoire et les pathologies respiratoires rencontrées lors de la collecte des données cliniques dans les différentes institutions de santé publique du Grand-Tunis. Suivie par les facteurs de risque associés aux maladies respiratoires. Les déterminants qui nous intéressent, en tant que géographes, sont ceux que l'on peut attribuer au contexte et en l'espace à l'environnement urbain : la pollution atmosphérique, le temps mais aussi le niveau socioéconomique des patients.

II. 1. LES MALADIES DE L'APPAREIL RESPIRATOIRE

Plusieurs maladies considérées comme résultant d'interactions complexes entre plusieurs facteurs dont l'environnement, le climat et la pollution atmosphérique. Ces agressions du climat et de la pollution de l'air ont comme principale cible l'appareil respiratoire de l'homme, ils peuvent avoir des effets nocifs à court et/ou à long terme.

II. 1. 1. Présentation de l'appareil respiratoire

L'appareil respiratoire est un ensemble d'organes et de tissus qui participent à la respiration, c'est-à-dire aux échanges de l'oxygène (O_2) et du dioxyde de carbone (CO_2) entre les cellules et le milieu extérieur. En moyenne, l'homme respire 15 m^3 d'air par jour (Annesi-Maesano *et al.*, 2006). De ce fait, l'appareil respiratoire constitue une voie d'exposition privilégiée pour les aérocontaminants, qu'il s'agisse de gaz ou de particules. Il est composé (Fig. 15) :

- Des voies respiratoires, qui permettent les échanges d'air entre l'atmosphère et les poumons. Elles comprennent : la cavité nasale et la bouche, le pharynx le larynx et la trachée ;

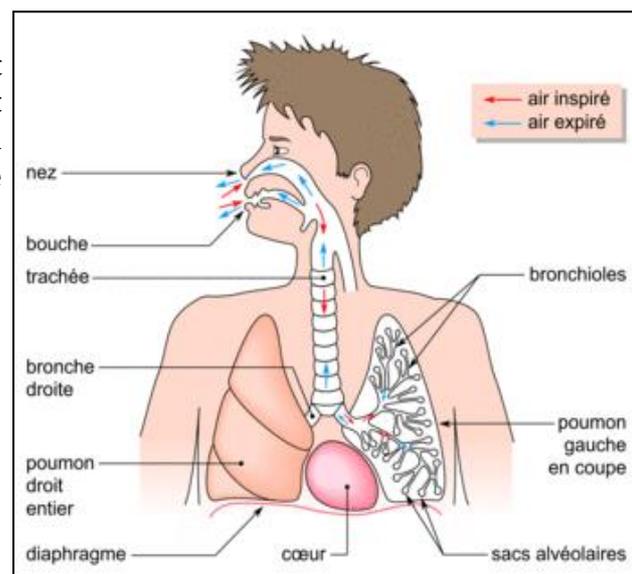


Figure 15 : L'appareil respiratoire.
(Source : www.lookfordiagnosis.com).

- Des voies intra-pulmonaires, qui amènent l'air des voies respiratoires jusqu'aux alvéoles pulmonaires. Ce sont : les bronches qui purifient, réchauffent et humidifient l'air, et sécrètent un mucus protecteur ainsi que les bronchioles, qui débouchent sur les sacs alvéolaires ;

- Des poumons, deux organes spongieux et élastiques qui renferment chacun environ 350 millions d'alvéoles pulmonaires ;

De la plèvre, un double feuillet séreux qui sécrète et contient le liquide pleural, et qui relie les poumons à la cage thoracique tout en les maintenant ouverts.(www.lookfordiagnosis.com).

L'appareil respiratoire est composé de plusieurs systèmes de défense contre les aérocontaminants :

-Le système nasal qui arrête les particules de taille supérieure à 10µm ;

- Le système mucociliaire qui agit comme un tapis roulant pour ramener jusqu'au carrefour aérodigestif les polluants enrobés ou dissous dans le mucus ;

- Le système macrophagique qui englobe ou digère les polluants.

Ces systèmes de défense peuvent néanmoins être dépassés. La sévérité des atteintes dépendra de la nature des substances nocives, de la quantité, du taux d'absorption mais aussi des facteurs individuels de susceptibilité. Les atteintes qui vont résulter de ces nuisances peuvent être diverses : irritation, inflammation, réaction fibreuse, sensibilisation allergique, transformation maligne... (Abdennadher, 1994).

II. 1. 2. Rappel élémentaire de quelques définitions pathologiques

Dans notre étude, nous nous intéressons qu'aux pathologies qui affectent l'appareil respiratoire de l'homme. Lors de notre collecte des données dans les hôpitaux et de l'enquête que nous avons réalisée, nous avons rencontré plusieurs pathologies respiratoires qui se développent dans l'environnement, le climat et l'air pollué. Nous avons exclu les maladies virales (grippe et tuberculose) rencontrées également lors de la collecte des données.

Les symptômes cliniques sont très fréquents, notamment dans les fiches des archives du service de pneumologie et aux urgences de l'hôpital La Rabta.

II. 1. 2. 1. Les pathologies respiratoires

Les pathologies respiratoires retenues sont les suivantes :

Allergie respiratoire

L'allergie est une réaction exagérée de l'organisme contre des substances étrangères (des antigènes) en soi. Les allergies aux pollens et aux acariens sont les plus répandues en Tunisie, viennent ensuite celles des animaux tels que le cafard. Les réactions allergiques sont : pleurs, yeux gonflés, éternuements, démangeaisons, rhume (Aubier *et al.*, 2009).

Asthme

L'asthme est une maladie inflammatoire chronique des voies aériennes des poumons, caractérisée par des épisodes récurrents d'obstruction bronchique avec sifflement (Du Pasquier, 2004 ; Tshimanga et Battisti, 2015).

Les causes de l'asthme sont multiples, il y a celles qui favorisent le développement de la maladie asthmatique (les facteurs génétiques) et celles qui en initient la symptomatologie (facteurs environnementaux) (Bouhajja, 2010), telles que le froid, l'exposition à des allergènes, une infection virale... (Baroudi et Janssens, 2013). Ces différents facteurs interviennent en proportion variable d'un sujet à l'autre. Le temps qu'il fait et le climat ont un impact peu contestable sur l'asthme, le premier agissant à court terme, le second à moyen ou long terme (Lafay et Perrin, 2007).

Les premiers cas d'asthme liés à la pollution ont été observés en 1946 à Tokyo/Yokohama parmi les aviateurs américains stationnés au Japon.

Bronchite

La bronchite aiguë est le diagnostic le plus souvent porté chez les patients atteints de toux. Il s'agit d'une infection respiratoire caractérisée par une toux sèche. Cette maladie arrive généralement au printemps ou à l'automne, par petites épidémies. Les facteurs responsables sont le tabagisme, la pollution atmosphérique et professionnelle. La fièvre et la toux caractérisent les bronchites aiguës alors que les toux persistantes et productrices sont les signes de bronchites chroniques (Aubier *et al.*, 2009).

BPCO (Broncho-pneumopathie Chronique Obstructive)

Cette maladie se traduit par une limitation progressive du débit ventilatoire et une difficulté de respirer qui en est la conséquence. Les facteurs de développement de la BPCO sont : la pollution urbaine, les facteurs professionnels qui causent une exposition intense à des poussières, des agents chimiques ou des gaz et la pollution de l'habitat liée à l'usage de combustibles (Aubier *et al.*, 2009).

Cancer broncho-pulmonaire

Il s'agit de la principale cause de décès par cancer chez les femmes et les hommes. Bien que, le tabagisme est le premier responsable des cas de cancer pulmonaire, il apparaît que la mauvaise qualité de l'air joue aussi un rôle. Ainsi, plusieurs études ont montré que ce cancer survient plus fréquemment dans les zones urbaines que dans les zones rurales (Martin et Maystre, 1988).

DDB (Dilatation des bronches)

La dilatation des bronches ou bronchiectasie est une maladie fréquente en Tunisie (Hamzaoui et Graïri, 2003). Elle est définie par une augmentation permanente et irréversible du calibre des bronches. Elle s'exprime habituellement par une hypersécrétion bronchique. Les mécanismes physiopathologiques intervenant dans la genèse de la maladie ainsi que dans sa pérennisation font intervenir des facteurs infectieux, mécaniques, environnementaux, toxiques ainsi que des facteurs liés à l'hôte (Aubier *et al.*, 2009).

Embolie pulmonaire

L'embolie pulmonaire est une affection fréquente et une cause importante de mortalité. Elle est due à la formation d'un caillot sur la paroi d'une veine. L'embolie se traduit par une gêne respiratoire, une douleur à la base du thorax, une accélération du cœur, une angoisse et parfois une hémoptysie (crachat du sang). Cependant, ces manifestations sont très variables selon le volume pulmonaire atteint. Le traitement de l'embolie pulmonaire nécessite une hospitalisation en urgence (Larousse.fr).

Emphysème

Cette pathologie est caractérisée par une distension des espaces et par une destruction progressive des parois des alvéoles pulmonaires. Les symptômes de l'emphysème sont : toux chronique, crachats et essoufflement (Aubier *et al.*, 2009).

Fibrose pulmonaire

La fibrose pulmonaire est une lésion des poumons caractérisée par une fibrose, c'est-à-dire la présence d'un excès de tissu conjonctif fibreux. La gêne respiratoire (dyspnée) est le principal symptôme.

La fibrose pulmonaire peut résulter d'une exposition significative à des agents environnementaux ou professionnels. L'exposition à des poussières inorganiques (amiante, silice, béryllium, poussières de métaux durs), à des poussières organiques (protéines animales, bactéries, moisissures, champignons) ou à des gaz et fumées, peut contribuer au développement d'une fibrose pulmonaire (Collard *et al.*, 2007).

Pleurésie

La pleurésie est une inflammation aiguë ou chronique de la plèvre, avec ou sans épanchement. La pleurésie se manifeste habituellement par une douleur thoracique localisée sur un côté du thorax, une toux, classiquement déclenchée par un changement de position, des difficultés respiratoires si l'épanchement de liquide est important (Aubier *et al.*, 2009).

Pneumonie

La pneumonie, appelée aussi pneumopathie, est une inflammation du tissu pulmonaire causée par des bactéries, des virus, des champignons et autres micro-organismes. Elle entraîne un remplissage des alvéoles pulmonaires par un liquide produit par le tissu enflammé. Les symptômes habituels de la pneumonie sont la toux, l'essoufflement, la fièvre et la fatigue (Aubier *et al.*, 2009).

Pneumothorax

Le pneumothorax est défini par la présence d'air dans l'espace pleural ayant pour conséquence un collapsus partiel ou complet du poumon. Il est plus fréquent chez les hommes. En Tunisie, au service pneumologique de l'hôpital de La Rabta, le pneumothorax spontané représente 7 % des causes d'hospitalisation (Mehiri *et al.*, 2004).

Rhinite allergique

L'asthme et la rhinite allergique sont l'expression d'une même maladie. Les études épidémiologiques ont démontré qu'un patient souffrant de rhinite a un risque multiplié par 3 à 7 de développer un asthme dans les 7 ans qui suivent (Dutau, 2008). La maladie allergique évolue selon l'âge, l'environnement de la personne et le traitement de la maladie (Charpin et Palot, 2003).

L'histoire naturelle de la maladie allergique est caractérisée par le passage d'une prédisposition à une sensibilisation. Puis cette sensibilisation à un allergène, avec les réactions croisées et les homologues entre allergènes, devient rapidement une polysensibilisation (facteur d'aggravation des allergies respiratoires).

Silicose

La silicose est une maladie pulmonaire causée par l'inhalation de poussière de dioxyde de silicium (silice) associée le plus souvent à d'autres poussières minérales comme le schiste, la houille et plus communément le talc. La silicose affecte essentiellement les mineurs exposés de façon chronique aux poussières de silice pendant de longues périodes. Elle touche aussi d'autres corps de métier comme les prothésistes dentaires et les personnes exposées aux forages ou aux sablage. Lors de la silicose, les poussières sont absorbées par la respiration (Servais, 2015).

II. 1. 2. 2. Les symptômes cliniques

Les symptômes constituent un diagnostic primitif avant d'identifier les causes et diagnostiquer la pathologie respiratoire. Ils sont le signe d'une exposition de courte durée du patient aux facteurs aggravants. Ces symptômes sont :

Détresse respiratoire

Le syndrome de détresse respiratoire est une forme sévère de défaillance, qui peut avoir de nombreuses causes (œdème pulmonaire, noyade, inhalation de fumée, crise d'asthme...). Elle se traduit par une impossibilité passagère de respirer normalement, lorsque les échanges gazeux de l'expiration et de l'inspiration ne sont plus efficaces (Larousse.fr).

Douleur thoracique

Classée comme maladie respiratoire, la douleur thoracique est un symptôme clinique, généralement associé à un trouble cardiaque ou pulmonaire (Larousse.fr).

Dyspnée

La dyspnée est une perception anormale et désagréable de la respiration, il s'agit donc d'une gêne respiratoire subjective dont se plaint le malade. Les mécanismes de la dyspnée sont complexes. Ils mettent en jeu des afférences nerveuses prenant origine au niveau des mécanorécepteurs des muscles respiratoires, des bronches, des poumons, de la paroi thoracique *via* les nerfs vagues et de chémorécepteurs centraux et périphériques, des centres respiratoires situés dans le tronc cérébral doués d'auto-rythmicité assurant la commande de la mécanique respiratoire *via* les muscles

respiratoires (Chabot, 2007 ; Brambilla, 2009). Selon les symptômes, la dyspnée peut cacher une ou plusieurs maladies respiratoires (Fig. 16).

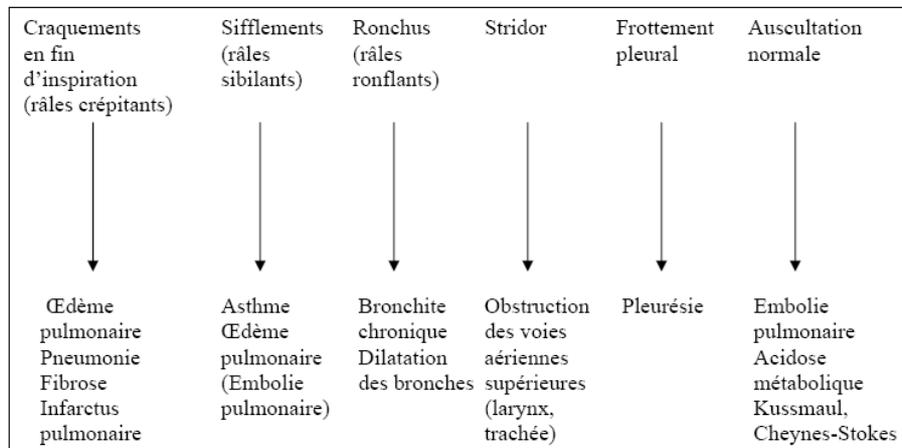


Figure 16 : Dyspnée, orientation étiologique en fonction de l'auscultation. (Source : Chabot, 2007).

Hémoptysie

L'hémoptysie est un symptôme fréquemment rencontré en pratique pneumologique, elle peut être définie comme l'expectoration de sang rouge vif, aéré, au cours d'efforts de toux. Elle se traduit par l'existence d'une anomalie pouvant siéger à tous les étages de l'appareil respiratoire (Aubier *et al.*, 2009 ; Cherif, 2005).

Toux

La toux est un symptôme présent dans presque toutes les pathologies respiratoires. Souvent la toux, notamment la toux chronique, pose de réels problèmes diagnostiques et thérapeutiques aux cliniciens et elle reste inexpliquée même après de multiples investigations diagnostiques et d'essais de traitements. Le point de départ de la démarche diagnostique est l'historique de la toux, l'examen clinique et la radiographie pulmonaire (Aubier *et al.*, 2009).

Quels facteurs sont à l'origine des maladies respiratoires ? Comment nuisent-ils à l'appareil respiratoire ?

II. 2. LA BIOMETEOROLOGIE DU FROID ET DE LA CHALEUR

Durant son existence, l'Homme vit dans une gamme très étroite et fortement protégée de température centrale. Les limites maximales de tolérance pour les cellules vivantes vont approximativement de 0°C (formation des cristaux de glace) à 45°C (coagulation thermique des protéines intracellulaires). En effet, pour la plupart des gens, la plage de température de confort se situe entre 20 et 27°C et la plage de l'humidité est de 35 à 60 %. Lorsque la température ou l'humidité ambiante sont plus élevées, les gens se sentent mal à l'aise. Tant que l'organisme est capable de réagir et de s'adapter aux conditions de chaleur et d'humidité ambiantes, il n'en subit pas de conséquences néfastes. Par contre, des températures ambiantes extrêmes, très élevées ou très basses, peuvent accabler les

mécanismes de thermorégulation de l'organisme et provoquer des troubles graves, et même entraîner la mort (Beauudeau *et al.*, 2004).

Comment réagit le corps humain face à une ambiance chaude et une ambiance froide ?

II. 2. 1. Les réponses physiologiques face à une ambiance chaude

Un organisme humain en bonne santé maintient une température corporelle constante d'environ 37°C. Une fluctuation de moins de 1°C selon l'heure de la journée, le niveau d'activité physique et l'état émotif est normale. Un changement de plus de 1°C de la température corporelle se produit seulement en cas de maladie ou lorsque le corps est capable de supporter les conditions environnementales, par exemple une chaleur extrême. Lorsque la température ambiante augmente, la température corporelle a tendance à augmenter. L'organisme réagit pour maintenir sa température interne constante en augmentant le débit sanguin cutané et en activant les glandes sudoripares². Ainsi, le corps augmente la vitesse à laquelle il perd de la chaleur afin de réduire son fardeau thermique. Dans une ambiance chaude très sévère, le gain de chaleur dépasse la perte et la température corporelle augmente, ce qui pose des risques pour la santé (CCHST, 2016).

II. 2. 2. Les réponses physiologiques face à une ambiance froide

Pour maintenir sa température à 37°C, l'organisme dispose de plusieurs mécanismes naturels de régulation thermique, dits « thermorégulateurs » :

- Les vaisseaux de la peau se contractent et diminuent de calibre, afin de redistribuer le sang en profondeur vers les organes vitaux (cœur, cerveau, tube digestif). Ce phénomène s'accompagne d'une augmentation de la tension artérielle, du rythme et de l'activité cardiaques ;
- La chaleur produite par le corps augmente. Elle provient d'un accroissement de l'activité musculaire (mouvement volontaire ou réaction réflexe de frisson, amplifiant la production jusqu'à 500 %). La chaleur peut être obtenue par une hausse de la dépense énergétique (transformation des aliments ou utilisation des réserves caloriques stockées par le corps).

Si ce système de régulation ne fonctionne pas correctement, l'organisme peut avoir des difficultés à lutter contre le froid. Par ailleurs, une différence importante dans la manière dont l'être humain réagit au froid par rapport à la chaleur réside dans le fait que son comportement joue un bien plus grand rôle dans la réponse au froid en vue de la régulation thermique. Par exemple, le fait de porter des vêtements appropriés et de prendre des postures qui réduisent la surface qui échange de la chaleur avec l'ambiance est bien plus important dans les conditions froides qu'à la chaleur (Kenny, 2008 ; Gonzales, 2012). Pour l'appareil respiratoire, l'inhalation d'air froid entraîne un refroidissement des voies respiratoires, ce qui tend à inhiber les mécanismes de lutte contre les infections (Eccles, 2002 ; Keatinge, 2002). L'inhalation d'air froid et sec peut poser des problèmes aux personnes sensibles à +10 ou +15°C.

² Une glande sudoripare : est une glande située sous la peau qui secrète la sueur. (Larousse Medical, 2006).

Les personnes en bonne santé qui affectent un travail léger à modéré n'auront besoin de protection particulière des voies respiratoires qu'à partir de -30°C (Gonzales, 2012).

II. 2. 3. Rôle du vent lors des ambiances thermiques

Le vent est un facteur de convection forcée qui renforce les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du corps. L'écart entre la température ambiante et la température ressentie est d'autant plus grand que l'écart entre la température ambiante et celle de la peau est grand et que le vent est fort (Lehoucq, 2000). Un vent soufflant à 30km/h avec une température réelle ou absolue de 10°C entraîne la même sensation qu'une température de 7°C en air calme. De même, un vent de 90km/h associé à une température de 10°C entraîne la même sensation qu'une température de -30°C par temps calme. (Keim *et al.*, 2002 ;).

II. 2. 4. Temps de latence entre le pic climatique et le début des impacts sanitaires

Certains effets sur la santé respiratoire dus aux paramètres météorologiques peuvent se présenter immédiatement ne dépassant pas un jour comme l'asthme, alors que d'autres décalages pouvant atteindre trois semaines entre le pic climatique notamment le froid et la survenue de l'effet sanitaire (Laaidi *et al.* , 2009) (Tab. 5). Pour les décès, le temps de latence entre le froid et l'impact sur les maladies respiratoires varie de 7 à 18 jours (Bustinza *et al.*, 2010).

Tableau 5 : Décalage entre pic de froid et impact sanitaire (morbidité ou mortalité).
(Source : Laaidi *et al.*, 2009)

J	J+1	J+2	J+3	J+21
Pic de froid				
Asthme au froid				
Embolies pulmonaires				
Pathologies respiratoires				

La pollution atmosphérique constitue un facteur de risque supplémentaire sur la santé respiratoire (Bobac, 2000).

II. 3. POLLUTION DE L'AIR ET SES IMPACTS NEGATIFS SUR LA SANTE RESPIRATOIRE

La qualité de l'air que nous respirons est de plus en plus remise en question en ce qui a trait à la santé respiratoire. Ainsi, de nombreux facteurs modulent la réaction inflammatoire des voies aériennes : durée de l'exposition, type et taille aérodynamique des particules polluantes.

II. 3. 1. Les réponses biologiques de l'appareil respiratoire aux polluants atmosphériques : ozone et particules en suspension

Outre sa fonction principale, l'appareil respiratoire est doté de mécanismes qui le protègent en éliminant les polluants atmosphériques ayant pénétré dans l'appareil respiratoire. La quantité et les types des irritants en cause influent sur la gravité des lésions pulmonaires (CCHST, 2012). Les réponses aux polluants atmosphériques vont de simples nuisances à la nécrose tissulaire et à la mort (Lippmann, 2002).

II. 3. 1. 1. Réaction de l'appareil respiratoire à l'ozone

L'ozone est un gaz agressif à odeur âcre, il pénètre facilement dans les voies respiratoires. Il peut irriter les muqueuses oculaires et respiratoires, provoquer des toux, des irritations du nez, des yeux et de la gorge ainsi que des altérations pulmonaires surtout chez les enfants et les asthmatiques (Kinney, 2008 ; Declercq, 2010 ; OMS, 2014).

L'ozone est absorbé dans les voies respiratoires supérieures et inférieures. La gravité des lésions dépend de la concentration d'ozone et de la durée d'exposition. Même une très courte exposition à une concentration relativement faible peut entraîner de graves lésions permanentes, voire la mort. L'exposition à une concentration extrêmement faible fait initialement augmenter la réactivité des voies respiratoires aux autres substances inhalées (hypersensibilité bronchique) et provoque une réponse inflammatoire des tissus respiratoires (Duclair environnement, 2011).

II. 3. 1. 2. Réaction de l'appareil respiratoire aux particules en suspension

Les particules en suspension ont plus d'effet sur la santé respiratoire que tous les autres polluants. Leur toxicité varie selon leur taille et leur composition chimique. Les PM₁₀ peuvent passer la barrière alvéolo-capillaire et restent bloqués au niveau des voies aériennes supérieures provoquant des affections comme la pharyngite ou la trachéite, spécifiquement chez les enfants (Marano, 2004 ; Airparif, 2008). Plus fréquemment, les particules en suspension fixent de nombreux produits toxiques : sulfates, nitrates, hydrocarbures, métaux lourds... ; suivant leur nature et les toxiques qu'elles véhiculent, elles pourront déclencher tout un cortège de réactions pathogènes touchant principalement le système respiratoire (Martin et Maystre, 1988).

Lorsque des particules de poussière irritantes se logent dans le nez, elles peuvent causer une rhinite ou une inflammation de la muqueuse nasale. Par contre, si elles s'attaquent aux plus larges voies aériennes, elles peuvent engendrer une inflammation des muqueuses de la trachée (trachéite) ou des bronches (bronchite) (CCHST, 2012). La taille des particules constitue le facteur critique permettant de déterminer à quel endroit dans les voies respiratoires des particules peuvent s'être déposées. Les particules de taille supérieure au PM₁₀ sont captées au niveau du segment naso-pharyngien puis évacuées par mouchage ou déglutition. Les particules grossières dépassent cette première barrière et pénètrent jusqu'au segment trachéo-bronchique. Certains polluants, comme la fumée du tabac, peuvent contrarier l'efficacité de ce système de défense. Les particules fines peuvent pénétrer dans le système respiratoire jusqu'aux alvéoles terminales (Prouvost et Declercq, 2007 ; Fig. 17).

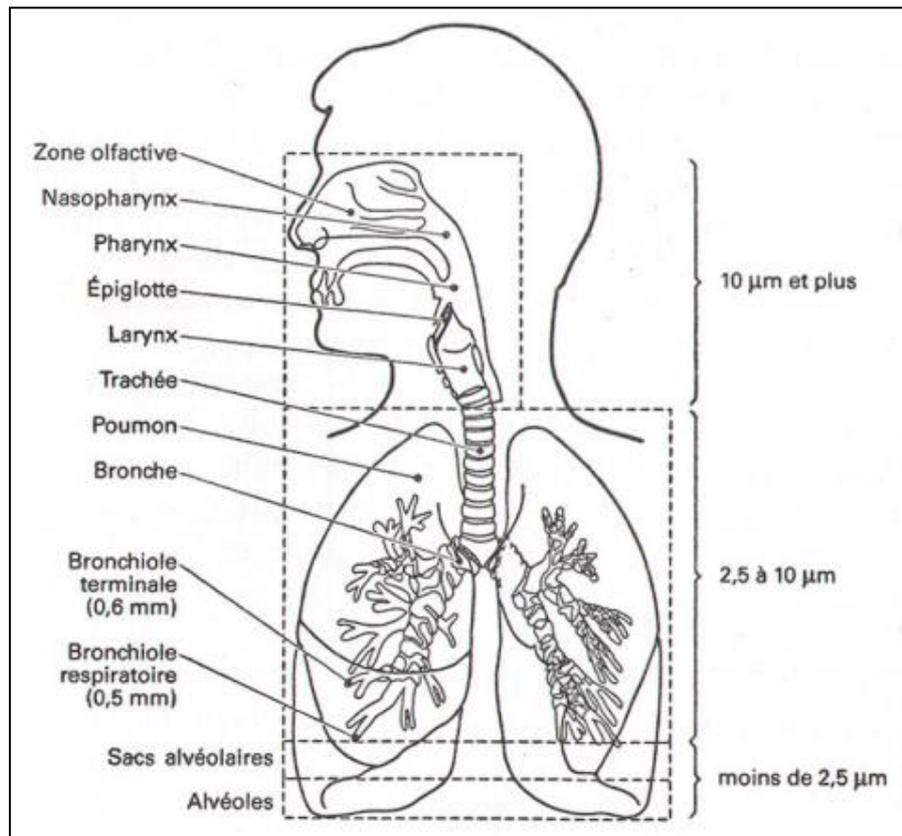


Figure 17 : Niveau de dépôt des particules inhalées dans l'appareil respiratoire selon leur taille. (Source : Prouvost et Declercq, 2007).

II. 3. 2. Deux types d'effets sanitaires de l'exposition à la pollution atmosphérique

Selon la durée de l'exposition, les effets de la pollution atmosphérique sur la santé, notamment la santé respiratoire, sont principalement de deux ordres : les effets d'une exposition à court terme et ceux d'une exposition à long terme.

II. 3. 2. 1. Effets immédiats d'une exposition à court terme

Les effets sanitaires d'une exposition courte à la pollution atmosphérique (quelques heures ou quelques jours après l'exposition) sont immédiats. Pendant lesquelles des manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques aiguës surviennent dans des délais brefs (quelques jours, semaines) à la suite d'une exposition ponctuelle aiguë (De Cotret, 2006 ; Laaidi *et al.*, 2009).

II. 3. 2. 2. Les effets d'une exposition à long terme

Les effets à long terme de l'exposition à la pollution atmosphérique se manifestent de manière moins ostensible, ils apparaissent, en effet, longtemps après l'exposition et il est difficile d'en déterminer toutes les causes. Une exposition de faible intensité mais prolongée à des polluants peut se traduire par le développement de processus pathogènes pouvant conduire, au final, à un événement morbide ou même au décès. Ces effets peuvent se manifester par des réactions immuno-allergiques possibles (rhinite,

sinusite, asthme, allergie), une augmentation des affections respiratoires (bronchites, rhino-pharyngites...) ou d'une dégradation de la fonction ventilatoire (baisse de cavité respiratoire, excès de toux ou de crises d'asthme), des effets mutagènes et cancérigènes (Quénel *et al.*, 2003).

Les facteurs environnementaux, le temps et qualité de l'air, sont des facteurs de risque majeur des maladies respiratoires mais également la prédisposition génétique et le niveau socio-économique du patient sont des facteurs non négligeables.

II. 4. L'IMPORTANCE DE L'ATOPIE, DU NIVEAU SOCIOECONOMIQUES ET LE TYPE DE PROFESSION SUR LA SANTE RESPIRATOIRE

Plusieurs facteurs et habitudes individuels peuvent être un risque à développer ou aggraver une maladie respiratoire, comme l'atopie, le niveau socioéconomique et éducationnel du patient mais aussi le type de profession.

II. 4. 1. L'atopie

L'atopie est définie comme la prédisposition héréditaire à développer des manifestations d'hypersensibilité immédiate telles que l'asthme, le rhume des foins et certaines rhinites et conjonctivites ainsi que diverses manifestations allergiques digestives. L'atopie est liée à des facteurs génétiques encore mal identifiés (Larousse Médical, 2006). En effet, la prédisposition à l'atopie est héréditaire. Pour l'asthme et l'allergie respiratoire, particulièrement, l'atopie est un facteur de risque le plus fréquemment mis en évidence (Lajoie *et al.*, 2013). Il est également établi que le risque pour l'enfant de développer une maladie allergique est d'autant plus grand que le nombre d'individus atteints dans la famille est élevé (Brändli et Braun-Fahrländer, 2002 ; Tab. 6).

Tableau 6 : Prédispositions familiales déterminant le risque de manifestation allergique chez l'enfant. (Source : Lajoie *et al.*, 2013)

Catégorie	Probabilité (%) d'être allergique pendant l'enfance
Aucun parent n'est allergique	De 5 à 15 %
Un des deux parents est allergique	De 20 à 40 %
Les deux parents sont allergiques	De 40 à 60 %
Les deux parents présentent le même type d'allergie	Jusqu'à 80 %

II. 4. 2. L'inégalité sociale devant la santé et la maladie respiratoire

Les inégalités sociales sont actuellement au cœur des débats sur la santé notamment la santé respiratoire. Toutes les sociétés analysées présentent des variations de l'état de santé de la population en fonction de la classe sociale, du revenu, de l'éducation, de la situation professionnelle et de la qualité de l'environnement social (Paquet, 1989 ; INSERM, 2014). Comment la situation socio-économique d'un individu influence-t-elle son état de santé respiratoire ?

Plusieurs études ont montré que les populations défavorisées économiquement présentaient plus de problèmes de santé respiratoires. Ces populations avaient en général un accès aux soins limité et une moins bonne hygiène de vie que les populations aisées (Wilkins *et al.*, 1990 ; Ferland *et al.*, 1995 ; Willems *et al.*, 2007).

Les inégalités socio-économiques se trouvent dans les chances de survivre aux maladies respiratoires, et c'est les personnes qui se trouvent en haut de l'échelle sociale qui sont les plus favorisées. Au Canada, à titre d'exemple, au cours des dernières années, les écarts selon le revenu augmentent pour deux causes de mortalité parmi eux le cancer du poumon (Wilkins *et al.*, 1990). En effet, ces personnes défavorisées sont plus vulnérables aux maladies et aux décès car ils présentent la plus grande proportion de mauvaises habitudes de vie (consommation de tabac et d'alcool, la pratique du sport, du sommeil, du poids en fonction de la taille...) (Ferland *et al.*, 1995). Cette différence peut s'expliquer aussi par l'accès aux services de soins de santé en général et aux services de médecins spécialisés qui comporte plus de barrières pour les patients ayant un statut socio-économiquement faible pour ceux ayant un statut élevé. Le manque de moyen financier se traduit aussi par un habitat peu sain et une malnutrition ou une alimentation moins saine, ce qui augmente le risque d'infection et des maladies.

Des écarts considérables sont notés aussi entre groupes de niveaux d'instruction différents. Un haut niveau d'instruction suit généralement un haut niveau socioéconomique.

Même s'il n'y a pas des études spécialisées, la situation socio-sanitaire des tunisois et les tunisiens en général n'est pas meilleure que la situation dans le reste du monde.

Les populations socio économiquement moins favorisées sont exposées à des concentrations plus élevées de polluants atmosphériques sur le lieu de travail, notamment les activités de bâtiment et travaux publics à proximité immédiate du trafic automobile, activités industrielles génératrices d'émanations toxiques (Laurent et Bard, 2007)... Et le travail dans certains de ces domaines représente une activité à risque important d'asthme ou d'allergie respiratoire professionnelle (Furon, 2007 ; Rosenberg, 2012).

II. 4. 3. Des métiers à risque de maladies professionnelles respiratoires

Les principales professions en cause dans l'apparition notamment de l'allergie et de l'asthme professionnel sont :

- Les peintres, en particulier les carrossiers automobiles. Les composés incriminés sont les iso-cyanates aggravés par l'utilisation de solvants ;
- Les boulangers, car ils sont en contact direct avec les poussières de céréales et des adjuvants ou contaminants de la farine (acariens, charançons, blattes...) ;

- Les métiers du bois et du bâtiment, les allergènes les plus fréquemment en cause dans ces métiers sont certaines colles et peintures comprenant des COV, des poussières de bois, chrome du ciment... ;
- Le métier de la coiffure : les coiffeurs sont au contact quotidien de produit de défrisage, de la laque, de colorants et décolorants capillaires qui peuvent provoquer des manifestations respiratoires lorsqu'ils sont inhalés. Parmi les divers produits chimiques auxquels ils sont exposés, citons l'eau oxygénée, les persulfates alcalins, les teintures végétales au henné, les teintures permanentes, les shampoings colorants, gels de coiffage ;
- Les professions de santé, par le biais du contact avec les procédures de désinfection des instruments et des locaux mettant en œuvre des désinfectants irritants et sensibilisants (glutaraldéhyde, orthophtalaldéhyde, formaldéhyde, oxyde d'éthylène ...), le latex des gants. S'y ajoutent les composants des produits de nettoyage auxquels sont exposés les agents des services hospitaliers et auxiliaires de vie ;
- Les professions en contact avec les animaux à cause des poils, plumes, déjections... (Furon, 2007 ; Rancé *et al.*, 2008 ; Rosenberg, 2012).

CONCLUSION

L'appareil respiratoire est l'organe le plus exposé face à la pollution atmosphérique et le climat. Lors de notre collecte des données cliniques dans les établissements de santé publics du Grand Tunis et de l'enquête que nous avons réalisée, nous avons recensé 14 pathologies respiratoires et 5 symptômes.

Le risque des polluants atmosphériques sur la santé respiratoire est influencé par la quantité et la durée d'exposition à ces polluants. Les effets sanitaires d'une exposition courte à la pollution atmosphérique sont immédiats tandis que les effets à long terme apparaissent longtemps après l'exposition.

La santé respiratoire dépend de l'atopie, c'est que la prédisposition familiale d'une maladie respiratoire, notamment l'asthme et l'allergie, détermine le risque de manifestation de ces pathologies chez l'enfant.

Les inégalités socio-économiques peuvent déterminer aussi la vulnérabilité aux maladies et aux décès par une maladie respiratoire. Les personnes défavorisées sont exposées à des concentrations plus élevées de polluants atmosphériques sur le lieu de travail, notamment les activités de bâtiment et travaux publics à proximité immédiate du trafic automobile, activités industrielles génératrices d'émanations toxiques.

Chapitre III : Données de base et méthodes

La mise en évidence des relations entre la santé et les deux irritants environnementaux, climat et polluants atmosphériques, impose la collecte préalable de trois catégories de données, les unes relatives aux pathologies respiratoires, les autres relatives aux états de l'atmosphère : des données météorologiques et ceux sur les taux de polluants atmosphériques.

III. 1. LES DONNEES : SOURCES ET QUALITE

III. 1. 1. Données de la pollution de l'air

Les données fondamentales de la pollution atmosphérique proviennent des mesures réalisées par l'ANPE (Agence Nationale de Protection de l'Environnement) dans les huit stations de mesure de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis.

En fonction de la disponibilité des données, nous choisissons d'étudier deux polluants : l'ozone (O₃) et les particules en suspension de taille inférieure à 10 microns (PM10). Leurs taux de concentration dans l'air seront mis en relation avec les paramètres climatiques d'une part et les données cliniques d'autre part. Nous aurons recours aussi aux polluants : le dioxyde d'azote (NO₂) et le dioxyde de soufre (SO₂) pour expliquer la concentration de l'un des polluants retenus. En outre, des données de NO₂ et de SO₂ sont disponibles mais leur qualité et quantité sont moindres. L'Annexe I indique le total des observations, des lacunes (en heures) et le pourcentage des lacunes des polluants (O₃, PM10, NO₂ et SO₂) issus des huit stations du Grand-Tunis entre 2005 et 2011.

Pour bénéficier d'un maximum d'informations, nous avons choisi des données horaires et des moyennes journalières, pour une période de sept ans, allant de 2005 à 2011.

Avant de traiter les données de la pollution de l'air, une longue phase pré-analytique de contrôle, de vérification de la continuité des données a été réalisée afin de s'assurer de leurs fiabilités. Cette phase de contrôle des données vise à détecter les données manquantes et les valeurs aberrantes.

Les huit stations de mesure de la pollution de l'air dans le Grand-Tunis n'offrent pas de données sur la totalité de la période choisie et présentent toutes de nombreuses lacunes dans les séries de données que ce soit journalières ou horaires (Annexe I).

Nous distinguons deux types de lacunes : des « lacunes régulières » et des « lacunes non régulières ». Les lacunes régulières sont remarquées durant 23h dans certaines stations (Beb Alioua, Beb Saadoun, La Manouba et Ghazela), toutes les années d'étude. Selon le responsable de l'ANPE, ces lacunes régulières sont dues au système d'acquisition de mesure (SAM). Les lacunes non régulières sont dues, le plus souvent, aux problèmes d'ordre techniques (climatiseurs cassés, problème de connexion...) ou humains tels que la destruction du matériel des stations.

Le tableau 7 présente les lacunes des données de mesure des polluants d'O₃, des PM10, de NO₂ et de SO₂. Les lacunes correspondent à des moyennes horaires. Une journée sans lacunes c'est une journée qui présente des données toutes les heures.

Seuls les PM₁₀ et l'O₃ sont enregistrés par toutes les stations de mesure de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis. Durant toute la période d'étude (2005-2011), aucune station ne présente des mesures sans lacunes. Les plus faibles taux de lacunes pour l'O₃ sont enregistrés à la station de Parc Ennahli en 2007 et 2008 avec respectivement 2 % et 2,7 % du total des mesures. Pour les PM₁₀, les taux de lacunes les plus faibles sont enregistrés en 2008 à la station de Beb Alioua (5,6 %) et de Ben Arous (5,4 %).

Une grande discontinuité de mesure pour les NO₂ et les SO₂, dans le temps et dans l'espace. Les NO₂ ne sont mesurés que dans quatre stations : Beb Saadoun, La Manouba, Ghazela et Beb Alioua. Les taux de lacunes les plus faibles sont enregistrés en 2005 à Beb Saadoun (8,7 %) et en 2008 à Beb Alioua (12 %). Pour les SO₂, les taux les plus faibles sont enregistrés en 2008 à Ghazela (11,2 %).

III.1. 2. Les données cliniques

Les données cliniques concernent les données de la morbidité respiratoire collectées dans les établissements de santé publics du Grand Tunis. Nous avons contacté les 11 hôpitaux publics qui présentent la spécialité de pneumologie. Seulement 4 d'entre eux ont accepté de collaborer avec nous.

Nous avons essayé de construire une base de données cliniques, représentative des principaux organismes de santé qui présentent la spécialité de pneumologie dans notre espace d'étude.

Dans la classification des données cliniques, nous allons adopter les terminologies utilisées par les médecins et les épidémiologistes : les données rétrospectives et les données prospectives. Les données sont dites rétrospectives lorsque la mesure de l'exposition survient après la survenue de l'évènement. Tandis qu'une étude est dite prospective lorsque l'exposition est mesurée avant la survenue de l'évènement étudié. La principale faiblesse des données rétrospectives est qu'elles sont souvent incomplètes. La validité des données est souvent difficile à vérifier, des informations capitales sont assez souvent manquantes. En revanche, les données prospectives sont généralement complètes.

III. 1. 2. 1. Les données rétrospectives

Les données rétrospectives recueillies sont essentiellement des archives des hôpitaux. L'accès aux archives hospitalières est beaucoup plus réglementé que pour les autres archives, ceci étant dû au secret médical. Pour avoir la permission de consulter les dossiers des patients, nous avons établi des conventions avec le centre hospitalo-universitaire « La Rabta », dans le but de faire une étude rétrospective à partir des archives des dossiers des patients admis dans cet établissement.

Les consultations externes de La Rabta

Au service de pneumologie du centre hospitalo-universitaire La Rabta à Tunis, nous avons recueilli les données des consultations externes quotidiennes des patients atteints de l'une des maladies respiratoires sur la période 2005-2010. Concernant les dossiers des patients, il est assez rare de trouver une fiche complète (avec date de consultation, sexe, âge, adresse, profession, pathologie, tabagisme, allergènes), les données les plus fréquentes sont la date de la consultation et le diagnostic.

À La Rabta, les jours des consultations sont du lundi au vendredi. Les samedis et les dimanches sont des jours de congé. Il n'y a pas également de consultations pendant les jours fériés : aïd (fête religieuse), jour de l'an... Les consultations sont de 7h à 13h30.

Les variables explicatives retenues sont : le numéro du dossier comme identifiant du patient, la date de consultation, le genre, le diagnostic et les types d'allergènes pour les patients allergiques.

Le nombre de consultations comptabilisé ne correspond pas au nombre de patients, certains d'entre eux pouvant être admis plusieurs fois pour la même pathologie au cours de la période d'étude. De ce fait, le dénombrement des patients ne prend pas en compte les rendez-vous, chaque visite étant donc une nouvelle consultation.

Vu le nombre important de patients enregistrés (16162), qui ont consulté le service de pneumologie de La Rabta durant la période d'étude, nous avons pris un échantillon de 15 % (Tab. 8).

- **Pourquoi un échantillon ?** C'est pour des raisons de délais, nous avons eu recours à l'échantillonnage, les résultats observations seront considérés comme généralisables à l'ensemble de la population.

- **La population cible :** les dossiers des consultations journalières des patients atteints de l'une des maladies respiratoires.

- **Taille de l'échantillon :** un échantillon de 2425 patients pour une population de 16162, soit 15 % du total.

- **Type d'échantillonnage utilisé :** nous avons eu recours à l'échantillonnage probabiliste où chaque unité a une « chance » d'être sélectionnée et que cette chance peut être qualifiée. C'est un échantillonnage probabiliste systématique : son principe c'est qu'il existe un écart, ou un intervalle entre chaque unité sélectionnée qui est inclus dans l'échantillon (Belhedi, 2010).

- **Mode d'administration :** Numéroté de 1 à N les unités incluses dans la base du sondage qui sont les dossiers des patients (où N est la taille de la population totale). Puis, déterminer l'intervalle de l'échantillonnage ou pas de sondage (k) en divisant la population N par la taille de l'échantillon que nous voulons obtenir.

Tableau 8 : Nombre de malades enregistrés et nombre de dossiers triés par l'échantillonnage (15%) entre 2005 et 2010. (Source des données : enquête personnelle réalisée à l'hôpital La Rabta).

Années	Nombre de patients	Nombre de dossiers triés par l'échantillonnage (15 %)
2005	3501	525
2006	2631	395
2007	2599	390
2008	2346	352
2009	2369	356
2010	2716	407
Total	16 162	2425

Lors de la consultation des archives du centre hospitalo-universitaire la Rabta, j'ai constaté qu'il existe des dossiers portant le même numéro, d'autre qui ne portent aucun numéro et qui sont donc non classés. Les infirmières ne m'ont pas averti de cet inconvénient lorsque j'ai compté le nombre total des dossiers sur une période de 6 ans.

Autre contrainte aussi aux archives de La Rabta, les fiches sont écrites à la hâte et ne sont pas toujours lisibles. S'ajoutent les abréviations des pathologies très présentes et je n'ai pu surpasser cette contrainte sans l'aide des médecins présents.

Les données des urgences La Rabta

La collecte des données des patients, hospitalisés au service des urgences du centre hospitalo-universitaire La Rabta, a été faite à partir d'un registre bien organisé, durant l'année 2009. Le service n'a commencé ce registre qu'à partir du mois de mai 2008 avec l'arrivée de la nouvelle chef de service. Le reste des dossiers des patients arrivés à l'urgence avant cette date se trouve dans une cave dans un état affreux et je n'ai pas pu les exploiter. Alors, je me suis simplement limitée aux données inscrites dans les registres.

Les informations inscrites dans ces registres concernent les patients hospitalisés aux urgences sont : la date d'admission et de sortie, le genre et le type de pathologie. J'ai éliminé les données concernant la profession, le tabagisme et l'adresse car ils ne sont pas renseignés de manière systématique.

III. 1. 2. 2. Les données prospectives

Les données prospectives intéressent l'étude sur les crises d'asthme et l'enquête personnelle.

L'étude spécialisée sur les crises d'asthme aux urgences de Ben Arous

Nous avons établi une étude prospective sur les caractéristiques épidémiologiques et bioclimatiques des crises d'asthme admis dans l'unité d'observation de courte durée (UOCD) du service d'urgence de l'hôpital régional de Ben Arous. C'est l'inclusion des crises d'asthme vues aux urgences du 1^{er} juin au 31 décembre 2011, avec un recueil des données épidémiologiques, bioclimatiques, cliniques et évolutives.

L'étude porte sur le nombre de cas journaliers de crises d'asthme arrivant aux urgences. Le recueil des données épidémiologiques est consigné sur une fiche et concernera 4 rubriques (Annexe II) :

- l'identification du patient ;
- les antécédents et allergies ;
- les caractéristiques de la maladie asthmatique ;
- les données se rapportant à l'exacerbation aiguë en cours et son évolution.

L'enquête personnelle

Nous avons procédé à un questionnaire visant les patients atteints d'une maladie respiratoire. Les entretiens se sont déroulés dans les cabinets des médecins de l'hôpital « Abderrahmen Mami » ainsi que dans d'autres endroits où j'ai pu trouver une personne concernée par le questionnaire. J'ai pu ainsi interviewer 130 personnes de différents âges.

Les informations collectées portent sur le patient et sur la maladie. Nous avons insisté sur les informations qu'on trouve rarement dans les fiches des dossiers des patients dans les archives, notamment l'âge, la profession, l'adresse, le tabagisme, le type de la maladie, l'âge de l'apparition de la maladie, l'éventuelle existence d'antécédents familiaux d'une pathologie respiratoire dans la famille et enfin les facteurs irritants. Le

questionnaire comporte peu de questions en une seule page. Les questions sont simples avec propositions, bien rédigées et ordonnées (Annexe III).

III. 1. 3. Les données météorologiques

Notre étude est basée en grande partie sur l'analyse des données météorologiques qui seront mises en relation avec les données de la pollution atmosphérique et les données cliniques. Comme document de base, nous nous servons des tableaux climatologiques des données journalières, des relevés tri-horaires et horaires des paramètres suivants ; la température de l'air ambiant (en °C), la pression atmosphérique (en hPa), l'humidité relative (en %), l'insolation (en heure par jour), la vitesse en (m/s) et la direction du vent (en degré). La période de référence s'étend sur 7 ans d'observation (2005-2011), le choix de cette période se justifie essentiellement par la période des données cliniques recueillies.

Une partie des données météorologiques est issue de l'Institut National de Météorologie (INM). Cependant, avoir toutes les données de l'INM est quasiment impossible, de ce fait nous avons eu recours aux sites internet, notamment *Weather Underground* et *rp5.ru*. Nous disposons aussi des données météorologiques mesurées dans trois stations de mesure de la qualité de l'air, fournies par l'ANPE avec les mesures des polluants atmosphériques : la Manouba, Ghazela et Beb Alioua. Les paramètres mesurés étant la température (en °C) et l'humidité relative de l'air (en %) sous abri à environ 4 m dans toutes les stations, la radiation solaire (en W/m²), la vitesse (en m/s) et la direction du vent (en degré) mesurées à environ 10 m ainsi que la pression atmosphérique (en hPa). Ces données météorologiques, comme celles des polluants atmosphériques présentent généralement de très nombreuses lacunes dans les séries.

Pour étudier les types de temps, les données sont également accessibles en ligne et extraites du site allemand *Wetterzentrale.de*.

La station météorologique de Tunis-Carthage est installée dans l'aéroport du même nom à 2 km de la mer et elle fonctionne depuis 1944. Un site plat en bord de mer située entre Sabkha de l'Ariana au nord et le lac de Tunis au sud. A l'ouest la station est relativement abritée par les monts de Jbal Ennahli. Cette station est loin des sites de mesure de la qualité de l'air et les caractéristiques morphologiques du milieu peuvent ne pas donner des explications pertinentes aux mesures de la pollution de l'air dans l'ensemble du Grand-Tunis, en particulier pour la mise en relation des taux de polluant avec les brises thermiques. Aussi, dans certains cas, dans des sites bien loin de la station, l'explication de la variabilité spatiale et temporelle repose sur des suppositions notamment en ce qui concerne la direction de la brise.

Nous disposons aussi des données sur les feux de forêt, concernant tous les incendies déclenchés durant la période allant de 2005 à 2010 dans le Grand-Tunis. Elles ont été fournies par l'Institut National de la Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts (INGREF).

III. 2. APPROCHES METHODOLOGIQUES

La relation entre environnement et santé est largement décrite dans la littérature, qu'il s'agisse de la morbidité ou de la mortalité. Elle est documentée dans de nombreux pays et villes avec des indicateurs qui diffèrent selon le niveau de pollution et le climat considéré.

Quels seront donc les indicateurs biométéorologiques et environnementaux spécifiques au Grand-Tunis, en relation essentiellement avec les maladies respiratoires ?

III. 2. 1. Méthode d'analyse de l'association entre climat et problèmes respiratoires

La bibliographie présentée dans l'introduction de cette thèse montre qu'il existe un lien direct ou indirect entre le climat et la recrudescence hospitalière ou la mortalité par pathologie respiratoire, suite aux épisodes des situations météorologiques extrêmes (vagues de chaleur et vagues de froid).

De nombreux travaux avaient comme but de modéliser cette relation entre le climat et la santé humaine et cela à partir des indices biométéorologiques comme l'indice K de Siple et Passel (1945) qui intègre la vitesse du vent et la température ; le THI (Temperature Humidity Index) de Thom (1959) qui intègre la température et l'humidité relative; l'Humidex, utilisé au Canada comme mesure de la chaleur perçue résultant de l'effet combiné de l'humidité excessive et d'une température élevée ; et cela afin de définir des valeurs seuils sensibles et spécifiques au-delà desquelles l'alerte de prévention, essentiellement, des vagues de chaleur et de froid sera déclenchée. Néanmoins, ces systèmes de prévention existent à un niveau local dans plusieurs villes du monde mais rares sont les systèmes internationaux.

En effet, les indices bioclimatiques existants sont développés pour les climats tempérés et froids. En Tunisie, le climat est de tendance douce en hiver et chaude en été, l'appréciation de la chaleur et du froid ne peut pas être jugée sous le même angle pour toutes les régions. De ce fait, aucune des méthodes appliquées ailleurs ne peut être transposée intégralement au contexte climatique tunisien. La difficulté principale consiste donc à trouver des indicateurs biométéorologiques et des seuils adaptés pour la Tunisie.

Quel indicateur de stress climatique doit-on utiliser pour prévoir des épisodes à risque pour la santé respiratoire ? Comment déterminer les seuils de l'indicateur qui sont prédictifs d'impacts sanitaires significatifs et qui pourront être utilisés pour déclencher des interventions préventives ?

Pour répondre à ces questions, nous avons choisi de travailler à partir des paroxysmes climatiques, afin de déterminer le rôle des extrêmes météorologiques dans les admissions hospitalières (Litvak *et al.*, 2005 ; Laaidi *et al.*, 2009 ; Ben Boubaker, 2006, 2010 ; Martel *et al.*, 2010 ; Alouane *et al.*, 2011 ; Lahmar, 2014).

L'analyse des associations entre les problèmes de santé respiratoire et les paramètres météorologiques sera basée sur la recherche de seuils, à partir desquels les situations météorologiques extrêmes pourraient entraîner une hausse significative d'hospitalisation ou de mortalité. Pour ce faire, il faut déterminer les facteurs de risque météorologiques et extraire les jours de pic des admissions hospitalières ou de décès à partir des données cliniques journalières recueillies auprès de différentes institutions sanitaires dans le Grand-Tunis.

III. 2. 2. Méthode d'analyse de l'association entre la pollution de l'air et les problèmes respiratoires

L'évaluation des risques sanitaires spécifiques liés aux épisodes de pollution pose des problèmes méthodologiques. La grande majorité des études épidémiologiques de la pollution atmosphérique se sont intéressées aux expositions aiguës qui ont évalué à court terme les variations des pics de la santé tels que la mortalité, les hospitalisations, les symptômes et la fonction pulmonaire associés aux variations des niveaux de pollution. Néanmoins, les études épidémiologiques les plus anciennes et les plus méthodologiquement simples sont celles qui évaluent les épisodes de pollution de l'air en comparant la mortalité et la morbidité avant, pendant et après des épisodes de pollution. D'autres études ont également analysé les visites aux services des urgences pour l'asthme, la maladie pulmonaire obstructive chronique et d'autres maladies respiratoires, et observé des associations à la pollution de l'air.

Dans cette étude, deux approches sont à suivre. D'une part, les pics de pollution des situations avec les admissions hospitalières dans le Grand-Tunis. D'autre part, nous allons intégrer les paramètres climatiques et ressortir les types de temps récurrents en périodes de pics. Compte tenu de l'effet de certains paramètres climatiques sur la dispersion des polluants dans l'atmosphère, nous étudierons aussi la relation entre les paramètres climatiques et les polluants.

CONCLUSION

Diverses données sont utilisées afin de répondre à la problématique de cette thèse. Elles sont de trois types :

- Les données de la qualité de l'air : ce sont les données des polluants issues de l'ANPE, qui proviennent de toutes les stations de mesure dans le Grand-Tunis. Ces données sont très lacunaires. Ces manques de données peuvent s'expliquer par une défaillance au niveau des capteurs mais aussi par une malfeasance humaine (destruction du matériel des stations). Pour retenir les meilleures séries de données homogénéisées et suffisamment longues, nous avons choisi d'étudier deux polluants : l'O₃ et les PM10 ;
- Les données cliniques : concernent les données des patients auprès de tous les types de structures sanitaires publiques spécialisées en pneumologie (hôpitaux et urgences). Nous avons procédé aussi à une enquête par questionnaire adressée à un nombre déterminé de patients par une maladie respiratoire concernant les facteurs irritants ;
- Les données météorologiques de base sont essentiellement des mesures de la station météorologique de Tunis-Carthage. Elles sont issues des archives de l'INM mais aussi, téléchargées *via* les sites internet et de certaines stations de mesure de la qualité de l'air.

La méthode choisie pour étudier la relation entre la santé respiratoire et les facteurs environnementaux, temps et pollution de l'air, sera basée sur des indicateurs et de seuils critiques des variables météorologiques et de la qualité de l'air entraînant un surplus d'admissions hospitalières pour causes respiratoires.

Chapitre IV : Facteurs de risque météorologiques

« Chaque fois, du fait de l'atmosphère, en présence d'un paroxysme météorologique de plus ou moins grande ampleur, une altération de l'état de santé a une certaine probabilité de se produire » (Besancenot, 2001). Selon Besancenot, il y a un risque sanitaire probable lors d'épisodes météorologiques extrêmes. Dans ce cadre, il va être nécessaire de s'interroger sur la définition des épisodes météorologiques extrêmes et à partir de quels seuils, ces situations deviennent paroxysmiques ?

Un paroxysme se définit comme étant le plus haut degré d'un phénomène ; il constitue l'un des phénomènes à risque susceptible de mettre en péril la vie de l'homme notamment après les vagues de chaleur mortelles des années 1998, 2003 ou 2006 (Ben Boubaker, 2006).

Dans ce chapitre, nous allons étudier les épisodes météorologiques extrêmes qui peuvent avoir un risque sur la santé respiratoire de l'Homme. Les données météorologiques retenues sont celles qui ont une influence plus ou moins directe sur la qualité de l'air, mais aussi qui déterminent l'ambiance climatique et le degré de confort thermique de l'organisme humain à savoir : la température de l'air (minimale et maximale), le vent (vitesse et direction), l'humidité relative de l'air (moyenne, minimale et maximale) et enfin l'insolation.

IV. 1. LES EXTREMES THERMIQUES

Le paroxysme thermique a été développé par Ben Boubaker en 2010 et utilisé dans plusieurs études scientifiques. Il a l'avantage d'associer simultanément la température de l'air ambiant diurne (T_{max}) et nocturne (T_{min}) à partir du calcul de la somme de la température maximale absolue et la température minimale absolue. Une façon de caractériser d'une manière synthétique l'ambiance thermique d'une journée fondée des seuils absolus de chaleur et de froid. Le paroxysme thermique nous paraît la méthode la plus adaptée au contexte tunisois.

IV. 1. 1. Les caractéristiques des jours paroxysmiques froids

Quatre seuils définissent les jours paroxysmiques froids. À partir desquels nous allons repérer la répartition saisonnière de ces jours durant la période d'étude (2005-2011). L'intensité et la persistance de ces jours paroxysmiques caractériseront les vagues de froid. Ces dernières représentent le risque le plus élevé pour la santé respiratoire notamment pour les personnes malades ou fragiles.

IV. 1. 1. 1. Les seuils absolus du paroxysme de froid

Les seuils absolus de froid retenus par Ben Boubaker (2010) sont identifiés par référence à la grille du froid présentée dans le tableau suivant (Tab. 9) :

- Les jours de grand froid : $T_{min} + T_{max} \leq 4 \text{ }^\circ\text{C}$;

- Les jours très froids : $5^{\circ}\text{C} \leq T_{\min}+T_{\max} \leq 9^{\circ}\text{C}$;
- Les jours froids : $10^{\circ}\text{C} \leq T_{\min}+T_{\max} \leq 14^{\circ}\text{C}$;
- Les jours frais : $15^{\circ}\text{C} \leq T_{\min}+T_{\max} \leq 25^{\circ}\text{C}$.

Tableau 9 : Typologie de froid. (Source : Ben Boubaker, 2010).

TX \ TN																
	0°C	1°C	2°C	3°C	4°C	5°C	6°C	7°C	8°C	9°C	10°C	11°C	12°C	13°C	14°C	15°C
-5°C	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-4°C	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-3°C	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-2°C	-2	Grand Froid			3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
-1°C	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1°C	1	2	3	4	Très Froid			8	9	10	11	12	13	14	15	16
2°C	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
3°C	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4°C	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
5°C	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
6°C	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
7°C	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
8°C	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
9°C	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
10°C	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

TX + TN	Journée
= 4°C	Grand froid
5° à 9°C	Très froid
10° à 14°C	Froid
= 15°C	Frais

Nous allons discerner la fréquence saisonnière des jours froids entre 2005 et 2011.

IV. 1. 1. 2. Fréquence des jours froids dans le Grand-Tunis entre 2005 et 2011

Entre 2005 et 2011, il n’y a aucun jour de « grand froid » et « très froid ». Toutes les années ne présentent que des jours « frais », à l’exception de l’année 2005, qui enregistre des jours « froids » (9 jours) (Fig. 18). La fréquence maximale des jours « frais » a été en 2005 avec 78 jours, vient en deuxième rang l’année 2006 avec 68 jours et l’année 2007 en dernière position avec seulement 43 de jours frais.

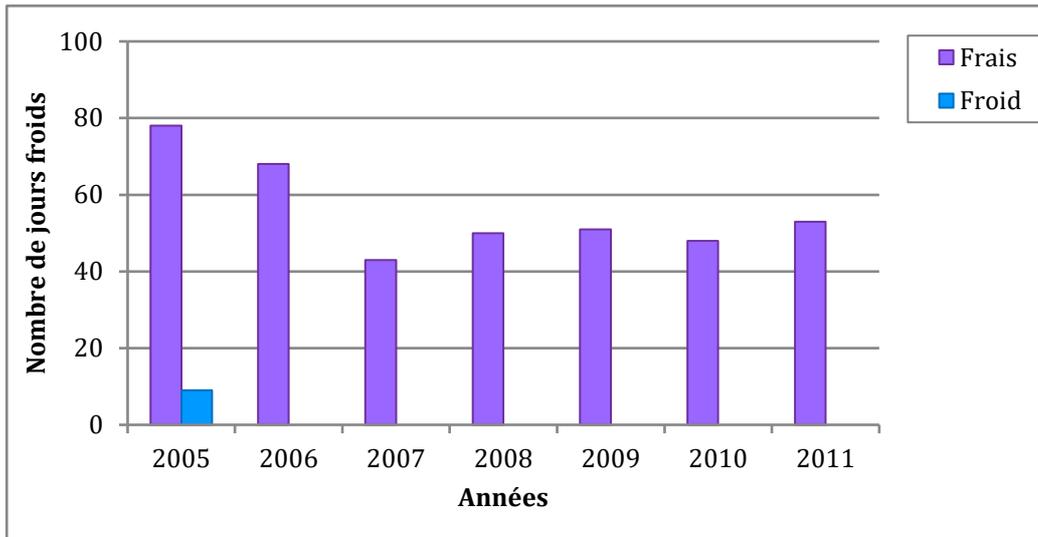


Figure 18 : Fréquence des jours froids ($10^{\circ}\text{C} \leq T_{\min}+T_{\max} \leq 14^{\circ}\text{C}$) et frais $15^{\circ}\text{C} \leq T_{\min}+T_{\max} \leq 25^{\circ}\text{C}$ de la période 2005-2011 à la station de Tunis-Carthage. (Source des données : INM).

Puisque les jours très froids sont inexistantes et les jours froids sont rares, nous qualifions de froide toute journée dont la somme de la température maximale (T_{\max}) et la température minimale (T_{\min}) est inférieure ou égale à 25°C ($T_{\max} + T_{\min} \leq 25^{\circ}\text{C}$) avec la température minimale absolue (T_{\min}) ne dépasse pas 10°C et la maximale absolue (T_{\max}) est inférieure ou égale à 15°C .

Il est évident que les jours de froid en Tunisie sont enregistrés principalement pendant la saison hivernale. Comme le montre la figure 19, pour toutes les années, la plus grande concentration des jours frais est enregistrée en hiver. Ils sont aussi présents au printemps mais rares en automne. Seules les années 2005 et 2007 connaissent des jours « frais » pendant les trois saisons.

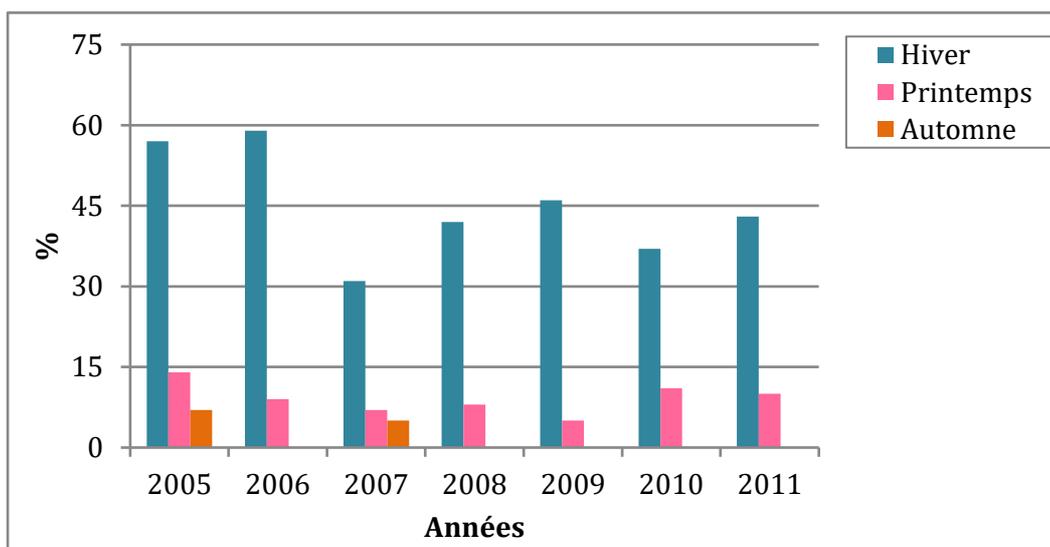


Figure 19 : Fréquences saisonnières des jours froids de 2005 à 2011 à la station de Tunis-Carthage. (Source des données : INM).

Les fréquences mensuelles des jours froids laissent apparaître que les mois hivernaux (janvier, février et décembre) détiennent le plus grand nombre de jours froids en durée et en intensité, soit 81 % du total des jours froids. Le mois de mars a connu 61 jours froids et le reste des jours sont répartis en avril (3 jours), octobre (un seul jour) et novembre (11 jours) (Fig. 20).

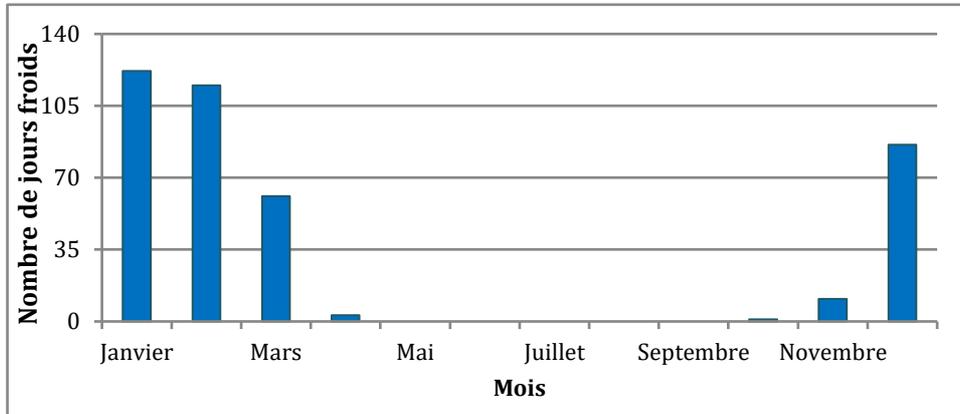


Figure 20 : Fréquences mensuelles des jours froids entre 2005 et 2011 à la station de Tunis-Carthage. (Source des données : INM).

La durée et l'intensité de la saison froide à Tunis sont variables d'une année à une autre ; la durée peut s'étendre sur 6 mois, de novembre à avril. Les jours froids sont omniprésents durant les mois d'hiver (décembre-février) pour toutes les années. Bien qu'ils peuvent être précoces en survenant en novembre ou tardifs au mois d'avril (Fig. 21).

L'année, 2005 paraît l'année la plus froide, elle détient le plus grand nombre de jours froids. Suivie par l'année 2006 en intensité mais pas en durée, puisque cette année-là les jours froids s'étendaient sur 4 mois seulement (de décembre à mars). L'année 2007, jugée comme l'année la plus douce durant ces 7 années, les jours froids s'étendaient sur 6 mois.

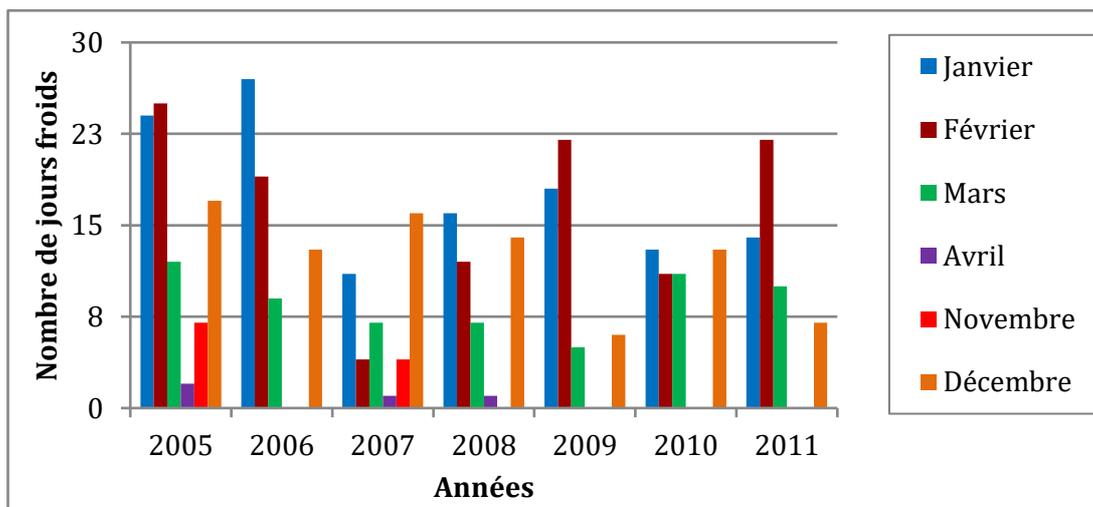


Figure 21 : Fréquences mensuelles du nombre de jours froids par année de la période 2005-2011 à la station de Tunis-Carthage. (Source des données : INM).

IV. 1. 1. 3. Les vagues de froid

Une vague de froid est un épisode de temps froid caractérisé par sa résistance, son intensité et son étendue géographique. L'épisode dure au moins deux jours. Les températures atteignent des valeurs nettement inférieures aux normales saisonnières de la région concernée. En France, une vague de froid avec des températures négatives dans la journée est souvent de 10°C en dessous des normales saisonnières. Cette situation doit durer au moins 7 jours, sinon il s'agit d'un coup de froid (Météo-France, 2015).

Les températures minimales en Tunisie sont bien loin des celles enregistrées en France, donc ne nous pouvons pas appliquer la définition française d'une vague de froid ni pour la valeur minimale de la température ni même pour la durée. Pour cette raison, pour l'identification de vague de froid dans le Grand-Tunis, nous retenons le seuil minimal de durée d'une vague de froid limité à 2 jours consécutifs. Ainsi, nous jugeons que 2 jours successifs de froids (avec une température minimale absolue (Tmin) ne dépasse pas 10°C et la maximale absolue (Tmax) est inférieure ou égale à 15°C) peuvent être suffisants pour que des effets néfastes pour la santé respiratoire apparaissent notamment pour les personnes fragiles et sensibles au froid. Donc une vague de froid est la succession de deux journées ou plus dont le seuil du paroxysme de froid (Tmax + Tmin) est inférieur ou égal à 25°C, sans limitations à l'intensité du froid. Répertoriées à différentes dates incluses dans notre période d'étude, les vagues de froid sont localisées par années comme suit (Tab. 10) :

Tableau 10 : Durée des vagues de froid en nombre de jours sur de la période 2005- 2011 pour la station de Tunis-Carthage. (Source des données : INM).

Durée Années	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	14	18	20	Total
2005	4	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	12
2006	5	1	2	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	12
2007	2	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5
2008	5	1	2	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	12
2009	3	4	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	10
2010	3	2	0	1	1	2	0	1	0	0	0	0	0	10
2011	2	2	2	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	10
Total	24	11	9	6	3	6	2	2	3	2	1	1	1	71

D'après ce tableau, le plus grand nombre de vagues de froid est de courte durée : de deux à quatre jours. Une seule année a connu une vague de froid, d'une vingtaine de jours successifs (2005) et une de 18 jours (2009).

Le classement des vagues de froid ne peut être défini qu'avec l'aide des seules températures minimales, et c'est l'ensemble des jours consécutifs où le minimum est inférieur ou égal à « -2°C » et la vague de froid contient au moins 2 jours (Météo-bordeaux, 2015). De ce fait, il n'a pas été possible de classer les vagues de froid dans le

Grand-Tunis car, durant toute la période d'étude, nous n'avons enregistré aucune valeur négative à Tunis-Carthage.

La moyenne des températures minimales quotidiennes de la saison froide (octobre-mars) de la période 2005-2011 est de 11,6°C. Les températures minimales absolues ont varié entre 1,6°C (le 10 janvier 2005 et le 07 janvier 2006) et 4,1°C (le 16 décembre 2007) (Fig. 22).

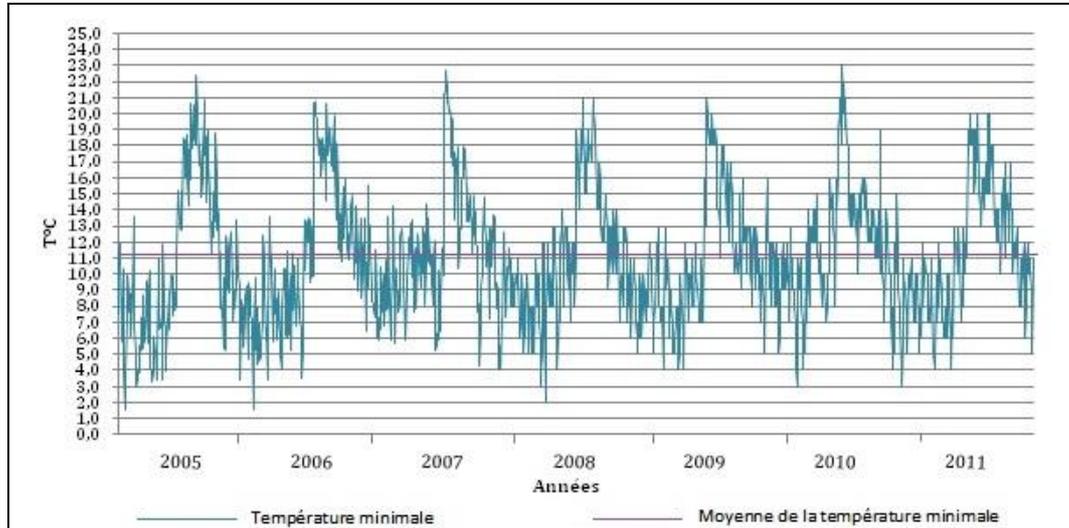


Figure 22 : Températures minimales absolues de la saison froide (octobre-mars) de la période 2005-2011 pour la station de Tunis-Carthage. (Sources de données : INM).

Les risques sanitaires des vagues de froid sont accrus pour toutes les personnes fragiles (personnes âgées, nourrissons, convalescents) ou atteintes de maladies respiratoires. Les personnes en bonne santé peuvent également éprouver les conséquences du froid surtout celles qui exercent un métier en plein air. Plus la durée de la vague est longue, plus elle nécessite de la vigilance pour les personnes fragiles aux basses températures.

IV. 1. 1. 4. La vague de froid de janvier 2005

En 2005, une vague de froid s'est installée du 25 au 30 janvier 2005. Elle a touché l'ouest du bassin méditerranéen et a été associée à des averses et des chutes des températures qui ont affecté la Tunisie. Il a neigé sur les hauteurs de la chaîne montagneuse de « Kroumirie » dans le nord-ouest du pays (INM, 2005). À la station de Tunis-Carthage, la température est descendue jusqu'à 3°C (le 26 janvier).

Cette année a enregistré aussi, la plus faible température minimale absolue avec une valeur de 1,6°C (le premier janvier 2005). La figure suivante (Fig. 23) montre que durant la vague de froid les températures minimales et maximales ont été plus faibles qu'avant ou après cette vague.

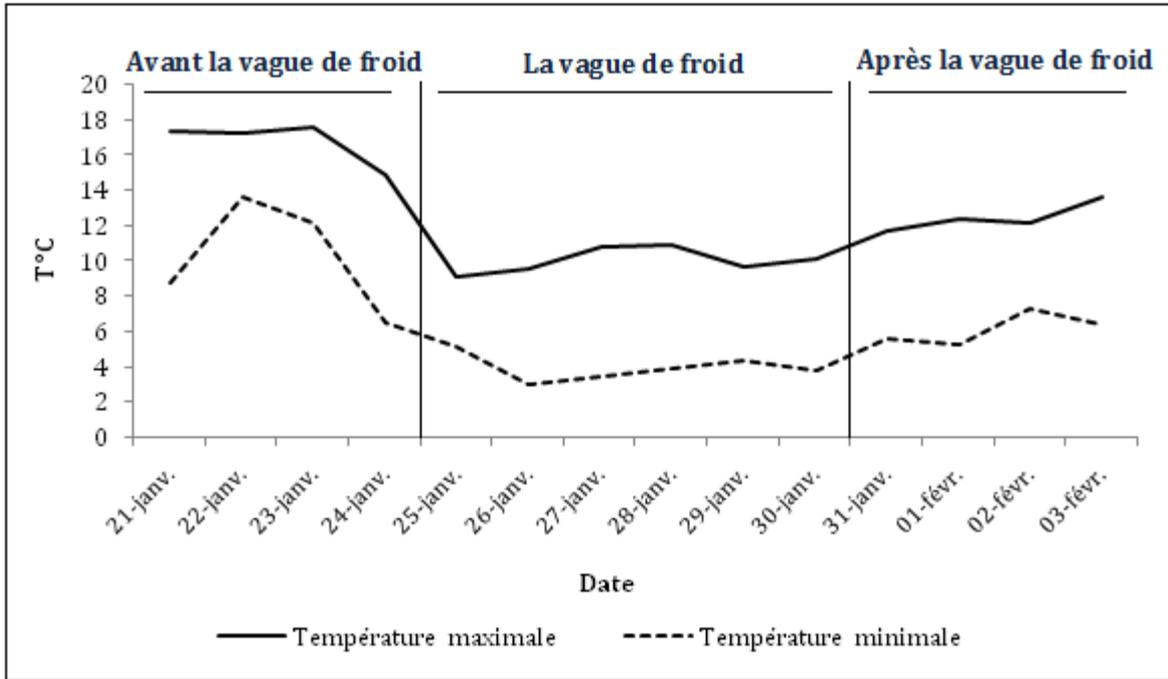


Figure 23 : Températures minimales et maximales journalières avant, pendant et après la vague de froid du 25-30 janvier 2005 à la station de Tunis Carthage. (Source des données : INM).

L'analyse des conditions synoptiques nous permet de connaître les facteurs à l'origine de cette vague de froid. Le 25 janvier, la situation synoptique au sol (Fig. 24) est caractérisée par une haute pression centrée sur les Îles Britanniques (1048 hPa) favorisant l'établissement d'un régime de nord-est perturbé vers la Méditerranée (front froid sur le nord de la Tunisie le 25 janvier 2005 à 00h TU). Une cellule dépressionnaire centrée à l'est de l'Italie (1000 hPa) favorisant l'advection d'une masse d'air froid d'origine polaire sur le Maghreb, elle est responsable d'une chute spectaculaire de la température à Tunis.

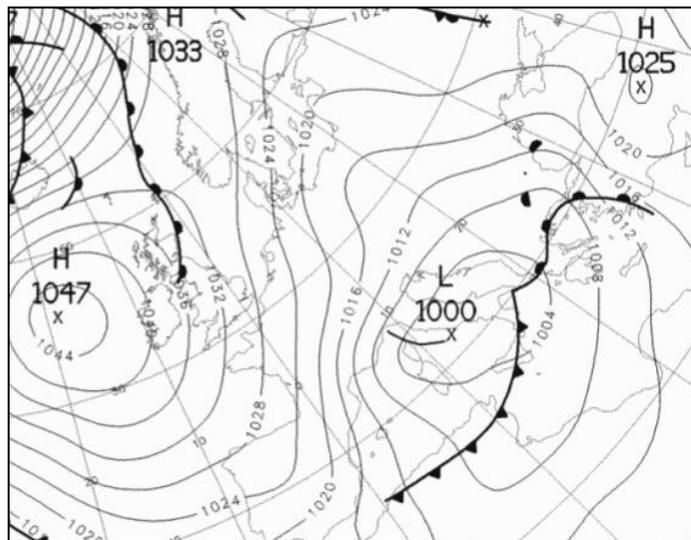


Figure 24 : Situation en surface du 25 janvier 2005 à 00h (TU). (Source : wetterzentrale.de).

Comme pour le froid, la chaleur accablante ou extrême peut présenter des risques importants pour la santé respiratoire.

IV. 1. 2. Variabilité des jours paroxysmiques chauds

Compte tenu de la spécificité bioclimatique de la Tunisie, Ben Boubaker propose 3 seuils paroxysmiques chauds, à partir desquels nous allons repérer la répartition saisonnière durant la période d'étude allant de 2005 à 2011. Ces seuils représentent les seuils physiologiques à partir desquels le corps humain commence à éprouver une sensation d'inconfort thermique, avec des conséquences possibles sur les personnes fragiles et les malades sensibles à la chaleur. L'intensité et la persistance des jours paroxysmiques caractériseront les vagues de chaleur, très fréquentes dans le Grand-Tunis.

IV. 1. 2. 1. Les seuils absolus du paroxysme de chaleur

Les seuils absolus de chaleur selon Ben Boubaker (2010) sont comme suit (Tab. 11):

- Les jours torrides : $T_{min} + T_{max} \geq 67^{\circ}\text{C}$;
- Les jours de très forte chaleur : $60^{\circ}\text{C} \leq T_{min} + T_{max} \leq 66^{\circ}\text{C}$;
- Les jours de forte chaleur : $T_{min} + T_{max} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 33^{\circ}\text{C}$.

Selon ces seuils de chaleur, un jour chaud est défini quand la température absolue maximale (T_{max}) est supérieure à 33°C et la température absolue minimale (T_{min}) est supérieure ou égale à 20°C .

Selon Ben Boubaker (2010), le seuil 33°C représente la température ordinaire de la peau. Si la température de l'air ambiant dépasse cette valeur, le corps commence à éprouver une sensation de chaleur, abstraction faite des autres facteurs d'ambiance. 20°C est la température absolue minimale qui représente le seuil au-dessus de laquelle une nuit est jugée à chaleur « tropicale ».

Tableau 11 : Typologie de chaleur. (Source : Ben Boubaker, 2010).

TX \ TN	TN													
	33°C	34°C	35°C	36°C	37°C	38°C	39°C	40°C	41°C	42°C	43°C	44°C	45°C	≥ 46°C
20°C	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
21°C	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
22°C	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
23°C	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
24°C	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
25°C	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
26°C	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
27°C	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
28°C	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74
≥ 29°C	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75

TX + TN	Journée
≥ 67°C	Torride
60° à 66°C	Très forte chaleur
53° à 59°C	Forte chaleur

IV. 1. 2. 2. Fréquence des jours paroxysmiques chauds dans le Grand-Tunis entre 2005 et 2011

La température diurne maximale la plus élevée de la période 2005-2011 a été de 46°C (24 juin 2007) et la température nocturne la plus élevée a été de $30,2^{\circ}\text{C}$ (30 août 2007). À l'échelle annuelle, et sans insister sur l'intensité de la chaleur, nous recensons 368 jours chauds ($T_{\text{min}} + T_{\text{max}} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{\text{min}} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{max}} > 33^{\circ}\text{C}$). Comme à l'échelle internationale, l'année 2009 dans le Grand-Tunis a été très chaude, elle a connu le plus grand nombre de jours chaud (67 jours), suivie par l'année 2008 (64 jours). Tandis que les années 2005 et 2010 détiennent le plus faible nombre de jours chaud sur la période d'étude avec respectivement 41 et 45 jours. Donc l'année qui détient le plus grand nombre de jours chauds dépasse celle qui en détient le moins par 26 jours (Fig. 25).

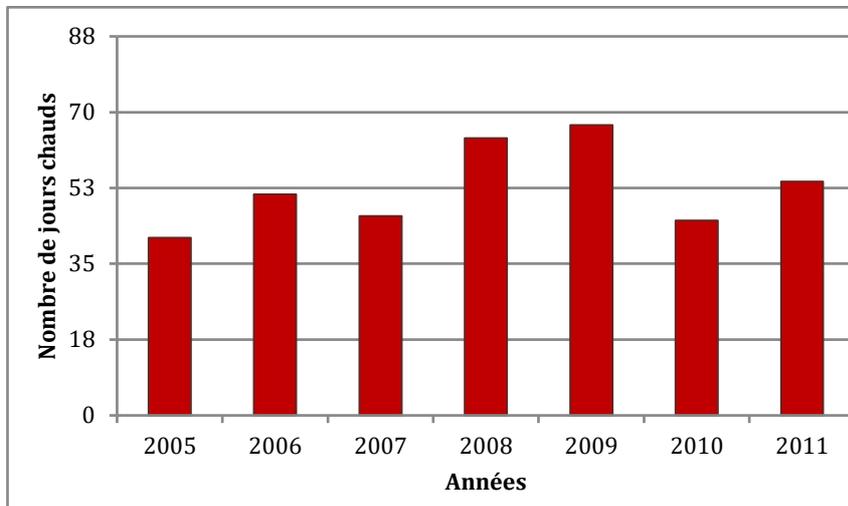


Figure 25 : Nombre de jours chauds ($T_{\text{min}} + T_{\text{max}} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{\text{min}} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{max}} > 33^{\circ}\text{C}$) à la station de Tunis-Carthage entre 2005 et 2011 (*Données : INM*).

Si nous analysons la fréquence des jours chauds, selon l'intensité de la chaleur, nous constatons que les jours à forte chaleur prédominent. Ils représentent 65 % du total des niveaux d'intensité de chaleur, suivie de loin par les jours à très forte chaleur (32 %) tandis que les jours torrides sont très rares et ne présentent que 3 % des jours chauds (Fig. 26).

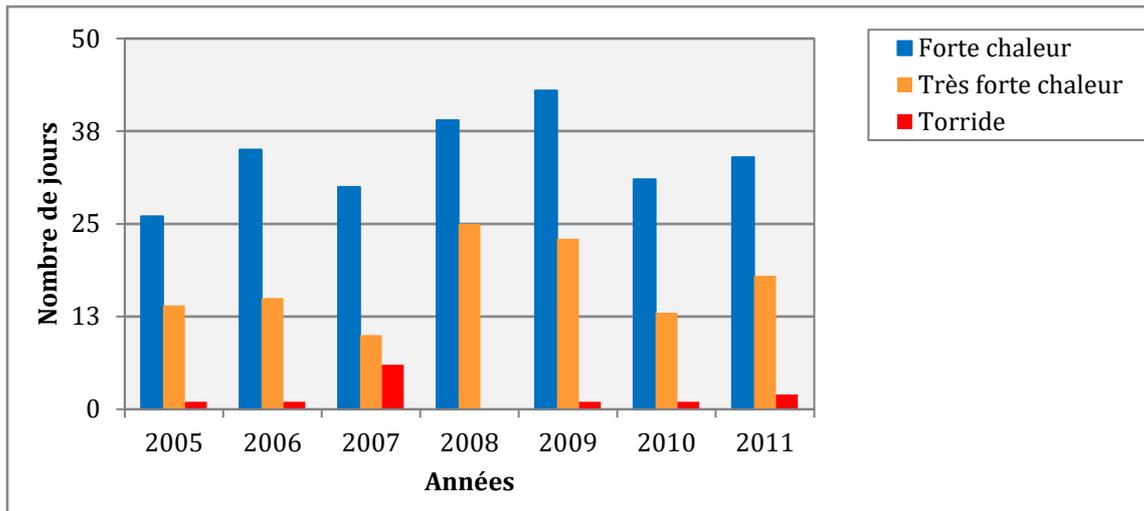


Figure 26 : Fréquences annuelles des jours chauds ($T_{min} + T_{max} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 33^{\circ}\text{C}$) à la station de Tunis-Carthage de la période 2005-2011. (Source des données : INM).

Pour les jours à forte chaleur, l'année 2009 se classe première avec 43 jours, suivie par l'année 2008 avec 39 jours et en dernière position vient l'année 2010 avec 26 jours.

Le plus grand nombre des jours à très forte chaleur a été enregistré en 2008, avec 25 jours et le plus faible nombre en 2007 avec seulement 10 jours. Les jours torrides sont très rares, ils sont au nombre de 12, durant toute la période d'étude, 6 en 2007, 2 en 2011 et 1 seul jour en 2005, 2006, 2009 et 2010. Tandis que l'année 2008 n'a connu aucun jour torride.

La saison à risque pour les jours à grande chaleur est de 6 mois, s'étendant du mois de mai au mois d'octobre. Les mois estivaux (juin-août) présentent le plus haut risque d'occurrence de paroxysme de chaleur dans le Grand-Tunis, durant la période 2005-2011: juillet et août détiennent les plus grands pourcentages de jours chauds avec respectivement 39 % (144 jours) et 35 % (128 jours) et le mois de juin 13 % (48 jours) du total des jours chauds. Le mois de septembre présente 11 % (42 jours). Cette saison chaude peut être précoce, survenant au mois de mai avec 1 % des jours chauds (3 jours), ou tardive, survenant en octobre avec 1 % (3 jours) (Fig. 27).

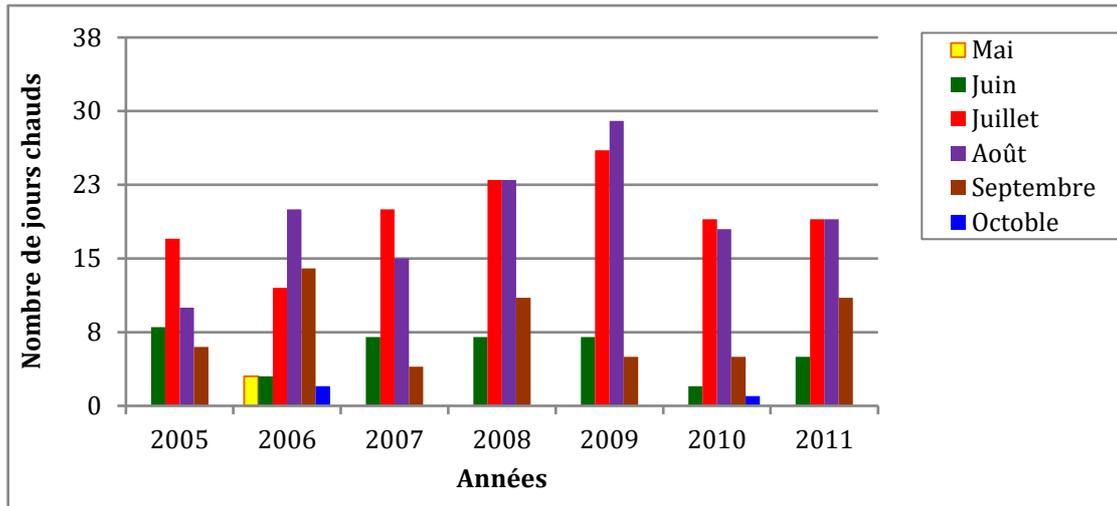


Figure 27 : Nombre de jours chauds ($T_{min}+T_{max} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 33^{\circ}\text{C}$) par mois de la saison chaude pour la période 2005-2011 à la station. (Source des données : INM).

IV. 1. 2. 3. Fréquence des vagues de chaleur

Il n'y a pas de définition standard d'une vague de chaleur. On sait depuis longtemps que des températures se maintenant à un niveau anormalement élevé peuvent provoquer de troubles hécatombes (Besancenot, 2002). La caractérisation thermique de la vague de chaleur est subjective, car elle dépend de la sensibilité des populations donc du lieu où elle se produit. L'OMM définit la vague de chaleur comme : « *un réchauffement important de l'air, ou une invasion d'air très chaud sur un vaste territoire, généralement de quelques jours à quelques semaines* » (OMM, 2014).

En pratique, une vague de chaleur, appelée aussi « *canicule* », est souvent identifiée a posteriori en regard de ses conséquences sanitaires. Les météorologues français privilégient le maintien pendant plusieurs jours de températures maximales voisines ou supérieures à un seuil compris entre 30 et 35°C selon les régions géographiques (Laaidi *et al.*, 2004). Pour les américains, il s'agit d'une période au cours de laquelle la température maximale dépasse 32,2°C pendant trois jours consécutifs aussi (SPF Santé publique, 2005). Pour le cas de la Tunisie, retenons les seuils absolus de chaleur proposés par Ben Boubaker (2010) avec la somme des températures absolues maximales (T_{max}) et des températures absolues minimales (T_{min}) soient strictement supérieures à 53°C ($T_{max} + T_{min} > 53^{\circ}\text{C}$). Ainsi, un jour chaud est défini comme étant un jour où la température absolue maximale est strictement supérieure à 33°C et la température absolue minimale est supérieure ou égale à 20°C.

Pour prendre en compte l'importance concomitante de l'intensité et de la durée des épisodes de chaleur sur la santé, une vague de chaleur a été définie comme une période d'au moins 3 jours chauds consécutifs, sans limitation à l'intensité de la chaleur.

Le climat du Grand-Tunis est méditerranéen à nuance semi-aride. De ce fait, les épisodes de forte chaleur sont relativement fréquents. D'après le tableau des durées des vagues de chaleur de la période 2005-2011 (Tab. 12), nous recensons 44 vagues de chaleur dans le Grand-Tunis. Du point de vue persistance, les vagues de chaleur répertoriées sont généralement des vagues courtes avec une durée de 3 ou 4 jours pour la majorité des années.

Tableau 12 : Les durées des vagues de chaleur, en jour, de la période 2005-2011 dans le Grand-Tunis. (Source des données : INM).

Durée	3	4	5	6	7	8	9	11	12	14	15	18	25	Total
Années														
2005	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6
2006	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	5
2007	3	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7
2008	2	1	1	1	0	0	0	2	0	1	0	0	0	8
2009	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	6
2010	2	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	6
	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	6
Total	11	7	6	2	1	1	4	4	3	2	1	1	1	44

La plus longue vague de chaleur a été enregistrée en 2009 avec 25 jours successifs. 2008 détient le plus grand nombre de vagues (9 vagues) tandis que les années 2005 et 2006 détiennent le plus faible nombre avec 5 vagues chacune. Au cours de ces vagues de chaleur, les températures maximales ont varié entre 33 et 46,6°C (le 24 juin 2007) et les minimales entre 20°C et 30,2°C (30 août 2007) à Tunis-Carthage.

IV. 2. 2. 3. 1. Classement des vagues de chaleur

Afin de caractériser et de comparer les vagues de chaleur répertoriées, nous allons les classer selon leurs poids et leurs intensités. Le poids des vagues de chaleur tient compte aussi bien des températures maximales et des températures minimales.

Le poids de chaleur, en degré Celsius, est la somme :

- des degrés-jours quotidiens sur la maximale, la base étant ici de 33°C. Le nombre de degrés-jours sur la maximale (DJX) ainsi défini d'un jour « j » est obtenu en ôtant 33,0° à la maximale de ce jour « j » ;
- de ses degrés-jours quotidiens sur la minimale, la base étant ici de 20°. Le nombre de degrés jours sur la minimale (DJN) ainsi défini d'un jour « j » est obtenu en ôtant 20° à la minimale de ce jour. Si la température minimale est inférieure à 20,0°C le degré jour sur la minimale sera égale à zéro. (meteo-beurdo.com).

De nombreuses vagues de chaleur sont survenues au cours de cette période de 2005-2011. De point de vue persistance, une vague de chaleur enregistrée en 2009 a été la plus longue avec 25 jours consécutifs (du 06 au 30 août 2009) et un poids de 156°C. La plus faible vague de chaleur, en durée et en poids, est celle de 2008 avec un poids de 5°C et une durée de 3 jours seulement. Elle a débuté le 29 août et a fini le 31 août 2008 (Fig. 28).

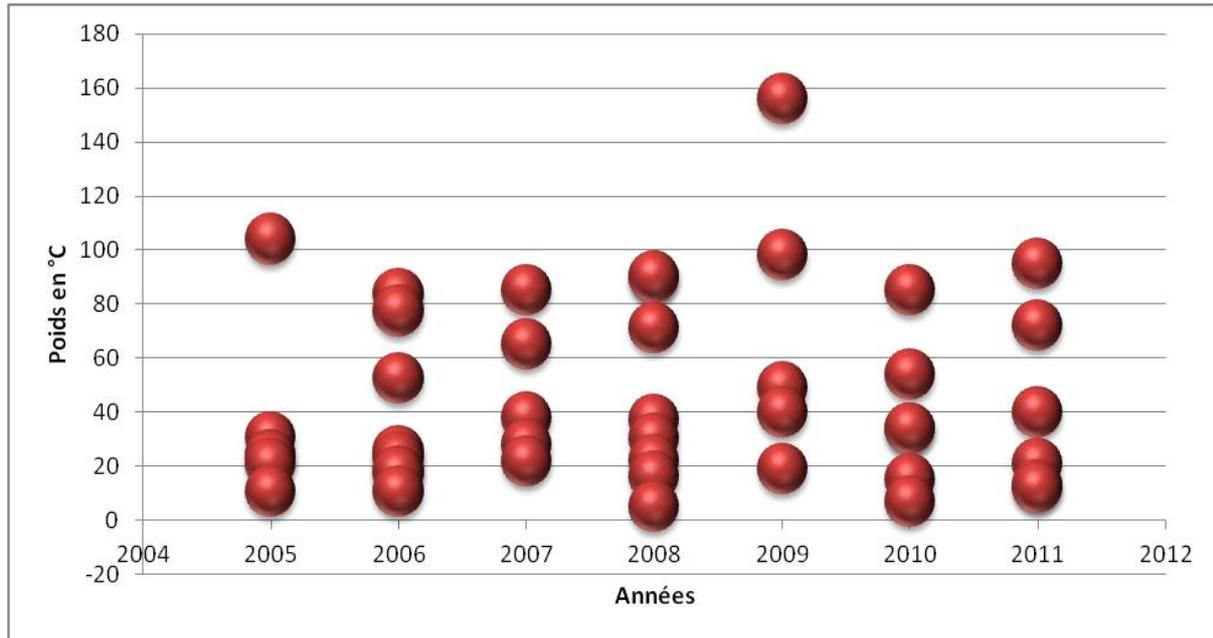


Figure 28 : Poids des vagues de chaleur (en °C) de la période 2005-2011 (*données : INM*). [Le cumul des degrés Celsius de la température absolue maximale au-delà de 33°C et des températures absolues minimales au-delà de 20°C].

Les douze plus importantes vagues de chaleur, ayant un poids supérieur à 70°C, sont produites en 2008 avec 4 vagues, les années 2006, 2009 et 2011 ont reconnu 2 vagues chacune, tandis que les années 2005 et 2007 n'ont enregistré qu'une seule grande vague chacune. Parmi ces vagues, celle du 06-30 août 2009 a été la plus remarquable en intensité et en durée (Tab. 13).

Tableau 13 : Les 12 vagues de chaleur les plus importantes ayant un poids supérieur à 70°C de la période 2005-2011. (*Source des données : INM*).

Périodes	Poids total (en °C)	Durée (en jours)
Du 06 au 30 août 2009	156	25
Du 21 juillet au 02 août 2005	103,9	13
Du 22 juillet au 04 août 2009	98	14
Du 08 au 19 juillet	95	12
Du 30 juin au 13 juillet 2008	90	14
Du 02 au 12 septembre 2008	90	11
Du 16 au 26 juillet 2007	85	11
Du 17 au 28 août 2008	85	12
Du 21 au 03 août 2006	83,8	14
Du 21 au 28 juin 2006	77,4	8

Du 18 au 28 août 2011	72	11
Du 30 juillet au 09 août 2008	71	11

IV. 1. 2. 3. 2. La vague de chaleur du mois d'août 2009

Du 06 au 30 août 2009, le Grand-Tunis a connu une vague de chaleur qui a duré 25 jours. 25 jours enchainés par des nuits tropicales au cours desquelles les températures ne sont jamais descendues en deçà de 20°C, avec des Tmin autour de 27°C et des Tmax entre 33°C et 40°C à Tunis Carthage.

La journée la plus chaude a été le 10 août 2009, une journée « brulante », avec une moyenne journalière de 32°C : Tmax = 39°C et Tmin = 27°C.

Les conditions barométriques du 10 août 2009 se caractérisent par une situation de marais barométrique. La Tunisie est sous l'effet d'un flux Sud à Sud-est apportant un air saharien très chaud et sec : le sirocco (Fig. 29).

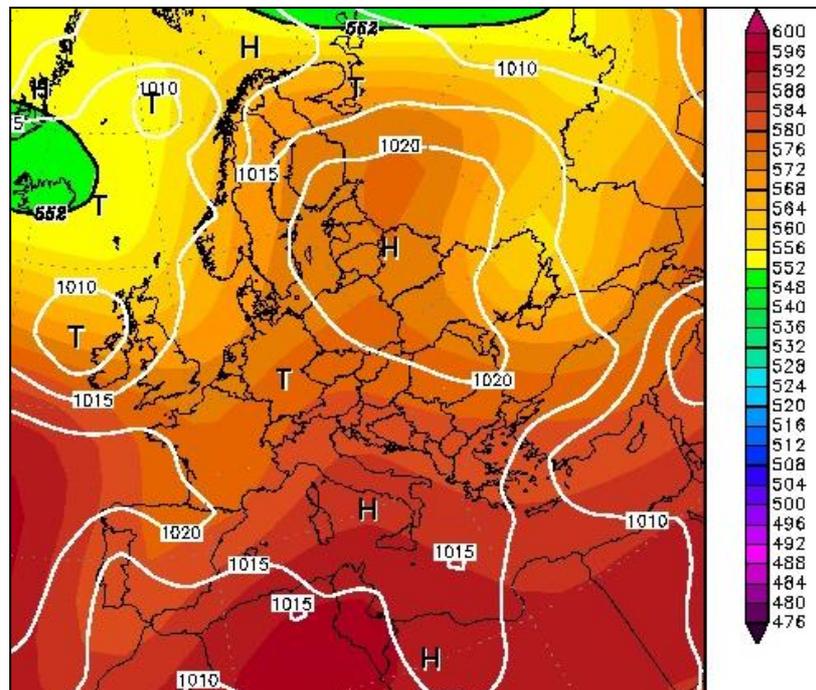


Figure 29 : Situation en surface et géo potentiel 500 hPa le 10 août 2009 à 00h. (Source : wetterzentrale.de).

IV. 2. LE VENT DANS LE GRAND-TUNIS ET SON IMPACT

Le vent est le paramètre climatique qui a le plus d'influence sur la qualité de l'air. Il oriente les fumés des panaches de pollution et les dirige, en fonction de la fréquence du vent dominant vers des espaces préférentiels. En période de pollinisation, le vent joue un rôle déterminant dans le transport des grains de pollen. Si le vent est faible (inférieur à 0,6 m/s) le dépôt du pollen au sol est presque immédiat et s'effectue à proximité de la plante. Un vent fort (supérieur à 43 km/h) peut emporter le pollen et le diluer dans

l'atmosphère. En revanche si le vent est modéré, il maintient les grains en suspension dans l'air et favorise leur concentration (www.asthma-allergies.org).

Selon les normes physiologiques de confort humain, Besancenot (1990) admet la vitesse du vent de 12 m/s comme limite supérieure de confort par grande chaleur, au-delà de laquelle l'effet mécanique du vent sur le corps devient passablement fatigant. Tandis que Alouane (2002) utilise un seuil plus bas (9-12 m/s) pour qualifier un vent fort en Tunisie ; il est très fort si sa vitesse va de 13 à 16 m/s. Au-dessus, c'est la tempête.

Nous allons étudier les caractéristiques du vent, sa vitesse et sa direction dans le Grand-Tunis pour la période 2005-2011. Cela nous permettra par la suite de comprendre les origines des masses d'air influençant la qualité de l'air et les admissions hospitalières.

Les données utilisées sont des données tri-horaires de la vitesse (en m/s) et la direction du vent (en degré). Nous disposons de huit enregistrements par jour : à 12h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h, heure locale à Tunis. Ces mesures correspondent à des vitesses moyennes du vent mesurées à 10 m au-dessus de la surface du sol sur une période de 10 minutes précédant immédiatement le moment de l'observation.

Pour la classification des vitesses du vent, nous nous référons au classement de Météo-France, adopté aussi par l'Institut International de la Météorologie en Tunisie (INM) pour les marins (Tab. 14).

Tableau 14 : Typologie du vent. (Source : Météo France).

Qualificatif	Vitesse en m/s
Vent faible	De 0 à 1
Vent modéré	De 2 à 4
Vent assez fort	De 5 à 7
Vent fort	De 8 à 11
Vent très fort	+ 12

Les directions du vent ont été représentées par des roses du vent divisées en 16 directions chacune occupant un angle de 22,5 degrés.

IV. 2. 1. Les caractéristiques de la vitesse du vent

IV. 2. 1. 1. La vitesse moyenne annuelle du vent

La répartition annuelle des tranches de vitesse du vent tri-horaire montre une prédominance des vents modérés (2 à 4 m/s) pour toutes les années. Cette tranche de vitesse représente environ 52 % de l'effectif total. En seconde position vient le vent faible (0 à 1 m/s) avec 23 % du total des tranches de vitesse de la période. Les vents

forts (8 à 11 m/s) sont rares, ils ne présentent que 4 % de l'effectif total. Les vents très forts, plus de 12 m/s, sont très rares, ils ne présentent que quelques observations tri-horaires pour toutes les années (Fig. 30).

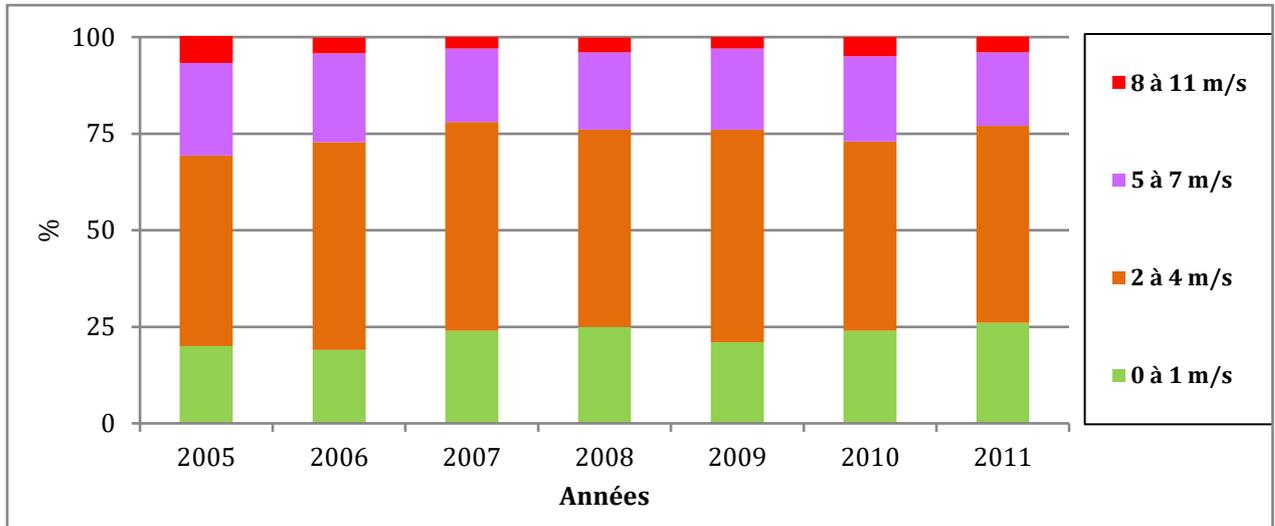


Figure 30 : Répartition annuelle des tranches de vitesse du vent tri-horaire (en %) à la station de Tunis-Carthage entre 2005 et 2011. (Source des données : INM).

IV. 2. 1. 2. La vitesse moyenne du vent à l'échelle mensuelle

À l'échelle mensuelle comme à l'échelle annuelle, les vents modérés (2 à 4 m/s) prédominent. Ils sont plus fréquents aux mois de décembre, novembre et octobre où ils dépassent 55 % du total des vitesses mensuelles. Le vent calme (0 à 1 m/s) est réparti sur tous les mois, néanmoins il est plus fréquent aux mois de septembre, octobre et novembre. Les mois printaniers (mars, avril et mai) ainsi que les deux mois estivaux (juin, juillet et août) s'avèrent les plus venteux. Ils détiennent les fréquences les plus élevées des vents supérieurs à 5 m/s. La fréquence mensuelle des vents forts (8 à 11 m/s) est très faible, elle varie entre 2 % aux mois d'octobre et de novembre et 8 % au mois de mars. Les vents très forts (plus que 12 m/s) sont négligeables et ne sont pas présentés sur le graphique (Fig. 31).

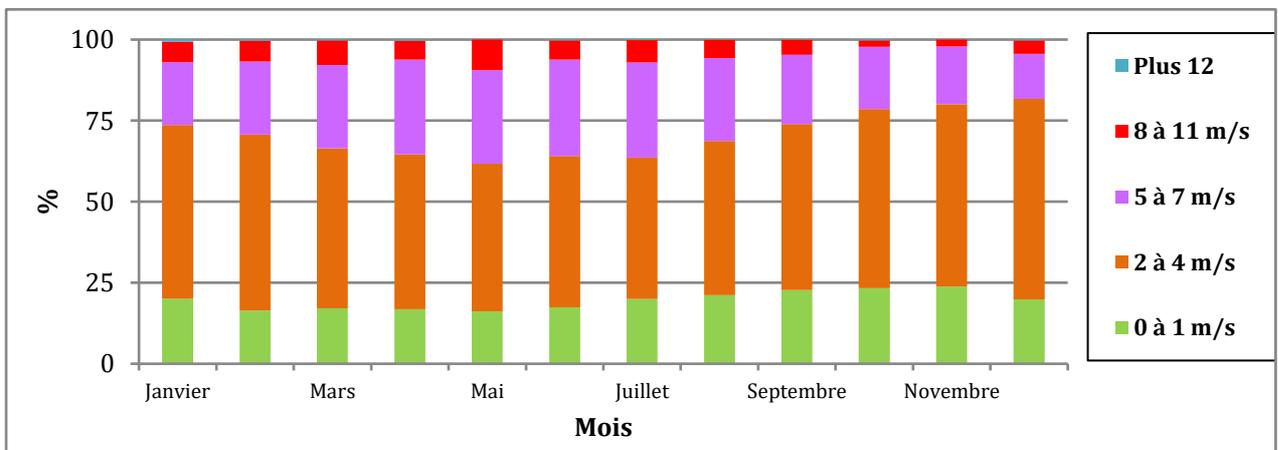


Figure 31 : Fréquence mensuelle moyenne des vitesses tri-horaires du vent par tranche de vitesse tri-horaires calculées sur la période 2005-2011 (Sources des données : INM).

IV. 2. 1. 3. Les caractéristiques de la direction du vent

IV. 2. 1. 3. 1. Les directions du vent à l'échelle annuelle par tranche des vitesses tri-horaires

La rose des vents annuelle par tranches de vitesses tri-horaires pour la station de Tunis-Carthage, réalisée sur la période 2005-2011, révèle une prédominance des vents du secteur W-N-W, qui représente 15 % du total des observations, toutes classes confondues. Suivies par les vents soufflants des secteurs NE et W avec 11 % chacun et W et S avec 8 % chacun. Cette dominance s'explique par les flux synoptiques d'ouest et du nord affectant la Tunisie surtout en hiver et en automne (Charfi, 2012).

Les vents soufflants des secteurs, N et NNE sont aussi importants, ils représentent respectivement : 7 % et 6 % du total des observations.

Les flux du WSW sont rares, ils ne représentent que 2 % seulement.

Comme pour la répartition mensuelle et annuelle, les tranches de vitesse des vents suivent le même classement : les vents relativement faibles (0-4 m/s) se classent premiers, suivis par les vents moyens (5-8 m/s) et en troisième et dernière place viennent les vents forts (plus 8 m/s) (Fig. 32).

Les vents faibles soufflent essentiellement du secteur WNW avec 12 % du total des vitesses de chaque tranche. Les vents moyens soufflent essentiellement du secteur NE qui représente 19 % du total des vitesses de chaque tranche. Tandis que 32 % des vents forts soufflent du secteur WNW.

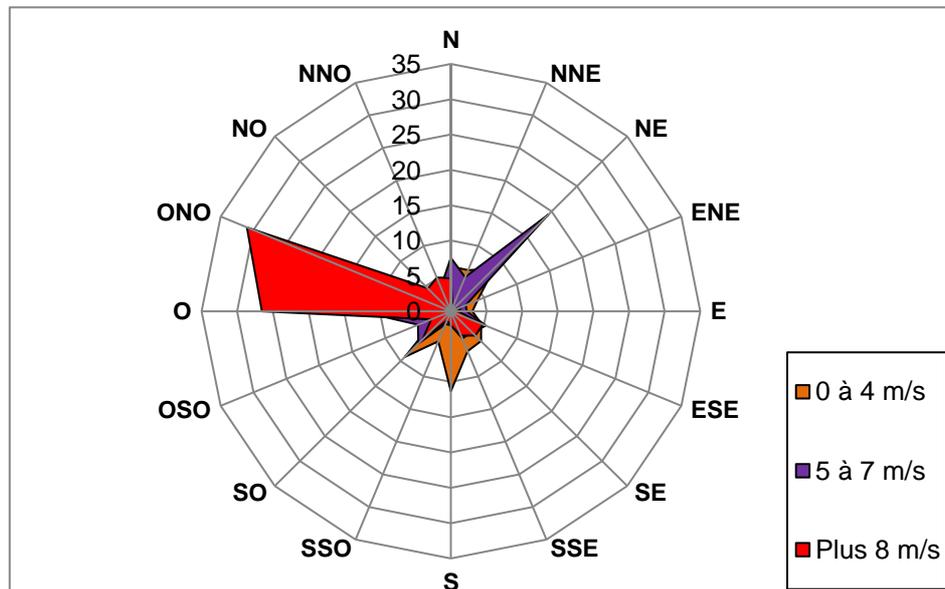


Figure 32 : Direction des vents tri-horaires par tranche de vitesses sur la période 2005-2011 à la station de Tunis-Carthage. (Sources des données : INM).

IV. 2. 1. 3. 2. Fréquences mensuelles des vents

L'analyse des roses de vent mensuelles à partir des observations tri-horaires de la période 2005-2011-, permet de dégager les caractéristiques éoliennes de chaque mois (Fig. 33 et 34) :

- Les mois les plus ventés sont mars et mai ;
- Les vents faibles (<5m/s), prédominant sur tous les mois ;
- Les flux de S et ONO prédominent pour les mois hivernaux. Le secteur ONO représente 22 % au mois de janvier, 15 % au mois de février et 16 % au mois de décembre. Et le secteur S représente 6 % au mois de janvier, 11 % au mois de février et 16 % au mois de décembre. Pendant ces mois, les situations calmes représentent 2 % du total des observations toutes les vitesses confondues.

L'été est une saison relativement ventée. Les situations de marais barométriques dominant pour cette saison (Hénia, 1998). Les vents forts soufflent essentiellement du secteur ONO, ils représentent 6 % des observations de cette saison estivale de la période 2005-2011. Les vents modérés ne sont pas négligeables pendant cette saison. Ils représentent 30 % du total des vitesses du vent au mois de juin, 31 % au mois de juillet et 24 % au mois d'août. Des vents modérés soufflent du secteur O et ONO.

Pendant cette saison estivale, les vents du quadrant sud sont souvent de faible vitesse (1 à 4 m/s), ils représentent 24 % au mois de juin, 23 % au mois de juillet et 27 % au mois d'août du total des directions dans cette tranche de vitesse. Ces vents des secteurs sud sont le plus souvent très chauds et secs d'origine saharienne : le sirocco, connu sous l'appellation locale de « Chihili ». Les caractéristiques thermiques et hygrométriques originelles du sirocco s'accroissent dans le nord de la Tunisie à cause de l'effet de foehn qu'il subit en descendant les monts de la Dorsale et les plateaux du Haut-Tell. Les brusques sautes de température qu'il provoque, conjuguées à sa sécheresse, font de lui un vent pénible à supporter par les êtres vivants (Hénia, 1980). Par ailleurs, sa vitesse, faible à modérée, est favorable aux fortes concentrations des polluants atmosphériques en milieu urbain (Zouari *et al.*, 1996). Quand le sirocco souffle avec une vitesse assez forte, qui dépasse 5 m/s, il peut entraîner avec lui des volutes de sable et de poussières d'origine anthropique (industrielle) et éolienne (arrachées au sol par le vent) qui rend l'air difficile à respirer. Ayant une longue trajectoire sur le Sahara, le sirocco est capable de soulever les particules sableuses, très abondantes dans le Sud tunisien et relativement meubles en saison sèche. Ce qui réduit beaucoup la visibilité, et des vents de sable peuvent se former. Ces poussières éoliennes présentent aussi un risque pour la santé (Hénia, 1980 ; Coudé-Gaussen, 1992 ; Hénia et Mougou, 1997, Dahech *et al.*, 2007).

L'analyse des roses des vents mensuelles relatives au printemps, laisse apparaître que durant ces mois, les vents faibles dominent, ils soufflent essentiellement du quadrant ONO (16 %). L'automne est la saison la plus calme de l'année, elle détient à elle seule 34 % des jours calmes (0 m/s) : mars 12 %, avril 8 % et mai 14 %. Suivie par les mois estivaux (29 %) : juin (9 %), juillet (10 %) et août (9 %). En troisième position ce sont les mois hivernaux qui se classent avec 26 % du total des jours calmes : décembre (6 %), janvier (9 %) et février (11 %). Et enfin l'automne est la saison la plus perturbée avec 12 % seulement de jours calmes : septembre (6 %), octobre (3 %) et novembre (3 %).

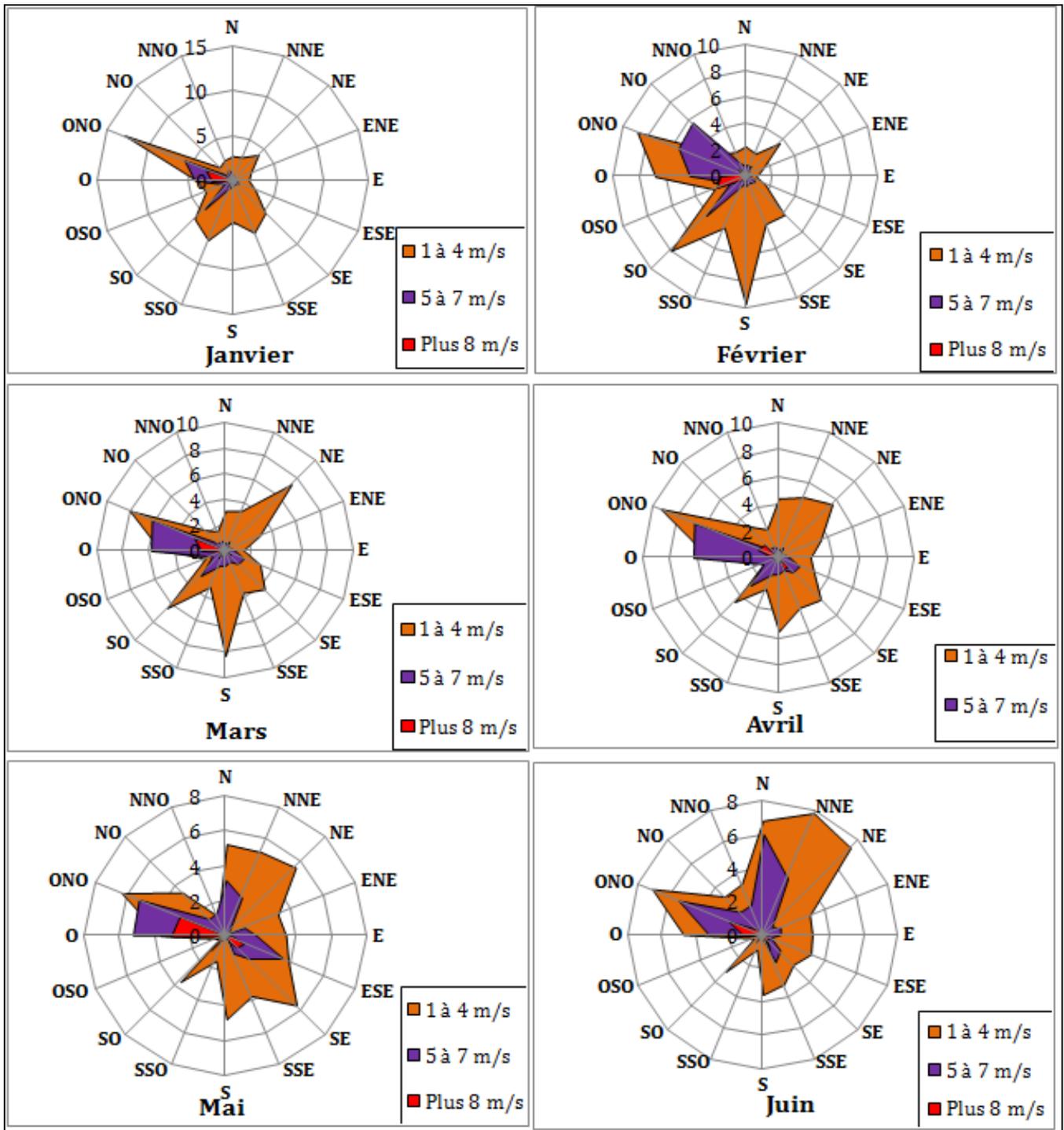


Figure 33 : Roses des vents mensuels moyens (de janvier à juin) à Tunis-Carthage pour la période 2005-2011 des données tri-horaires. (Source des données : INM).

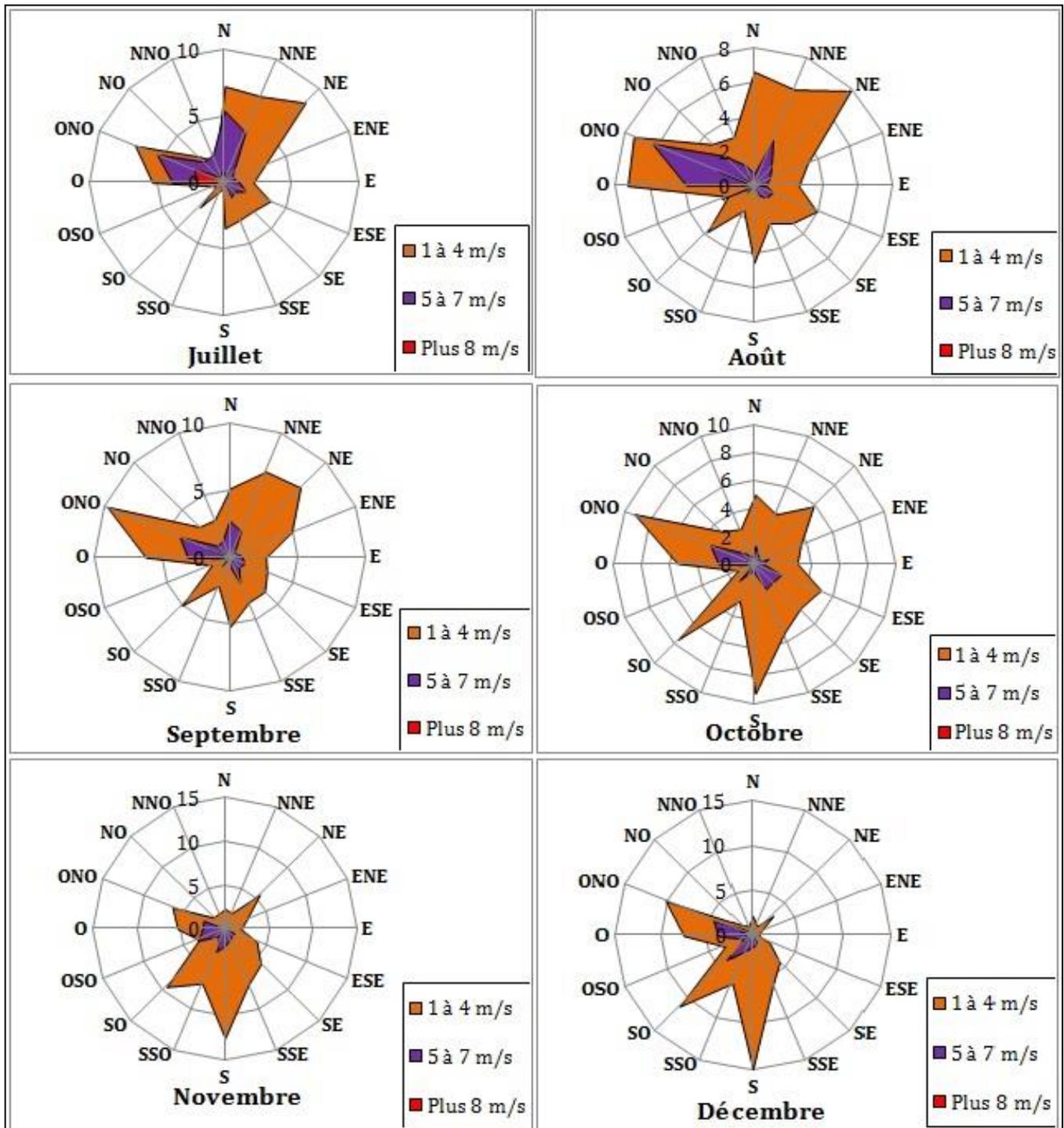


Figure 34 : Roses des vents mensuelles (de juillet à décembre) à Tunis-Carthage de la période 2005-2011 des données tri-horaires. (Sources des données : INM).

IV. 2. 2. Fréquences des vents forts dans le Grand-Tunis

Les vents forts dont la vitesse est supérieure ou égale à 8 m/s, sont rares dans le Grand-Tunis, ils ne représentent que 6 % du total des vents actifs. Ces vents sont un peu moins fréquents en automne que durant les autres saisons (Fig. 35 A) et ils soufflent essentiellement du secteur WNW et W avec respectivement 31 % et 27 % du total des observations (Fig. 35 B).

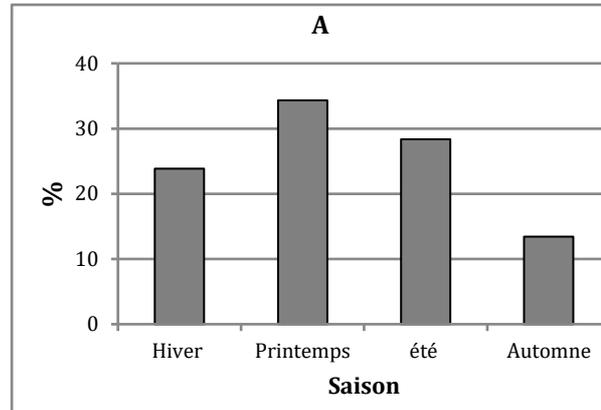


Figure 35 : Répartition saisonnière des fréquences (A) et rose de vents (B), des vents forts (plus 8 m/s) des observations tri-horaires à la station de Tunis-Carthage de la période 2005-2011. (Source des données : INM).

À l'échelle mensuelle, c'est le mois de mai qui enregistre le plus grand nombre de cas de vents forts avec une fréquence de 14 % du total des observations, suivie par le mois de mars avec 12 %. Tandis que les mois d'octobre et de novembre sont les mois qui connaissent les plus faibles fréquences de vents forts avec seulement 3 % du total enregistrés pendant la période 2005-2011 (Fig. 36).

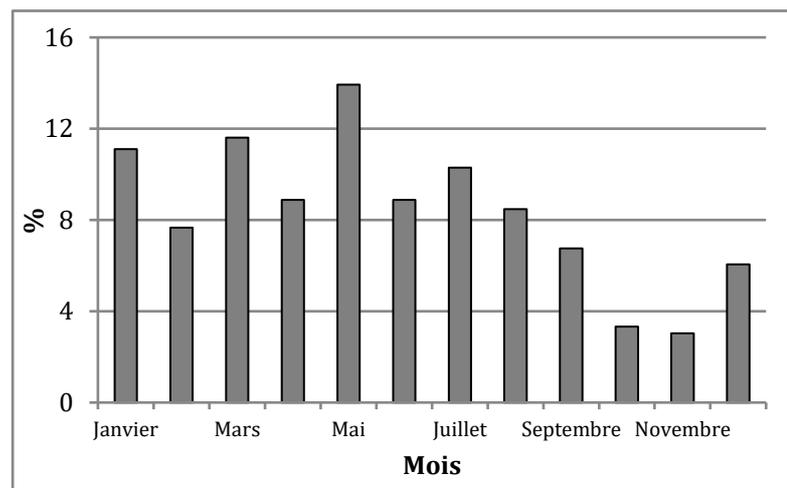


Figure 36 : Fréquences mensuelles des vents forts (plus 8m/s) calculés à partir des données tri-horaires à la station de Tunis-Carthage de la période 2005-2011. (Source des données : INM).

IV. 3. UNE DUREE D'ENSOLEILLEMENT IMPORTANTE

Par définition, l'ensoleillement en un lieu est caractérisé par la durée d'insolation, correspondant à la durée (heure et minutes) par jour pendant laquelle le soleil a brillé et donc n'a pas été occulté par un nuage. L'ensoleillement est un élément essentiel pour la formation des polluants secondaires notamment l'O₃. En effet, le nombre d'heures de soleil favorise la formation de ce dernier, qui a besoin du soleil et spécialement de rayonnement ultraviolet pour se développer.

Pour l'étude de l'ensoleillement, nous disposons des observations horaires de l'insolation enregistrées à la station de Tunis-Carthage, des mesures de 4 ans allant de 2005 à 2008.

Sur la période 2005-2008, la moyenne de l'insolation est de 247h. En été, les valeurs moyennes des températures sont très élevées et l'ensoleillement est maximum. La durée est de l'ordre de 394 h au mois de juillet, 329 h en août et 310 h au mois de juin. Pendant les saisons intermédiaires, l'insolation est aussi importante, elle est de 302 h au mois de mai et 249 h au mois de septembre. Durant les autres mois, l'insolation varie entre 192 h et 213 h. Tandis que l'hiver constitue la période où la durée moyenne de l'insolation est la plus courte de l'année : 188 h en janvier, 176 h au mois de février et seulement 160 h en décembre (Fig. 37).

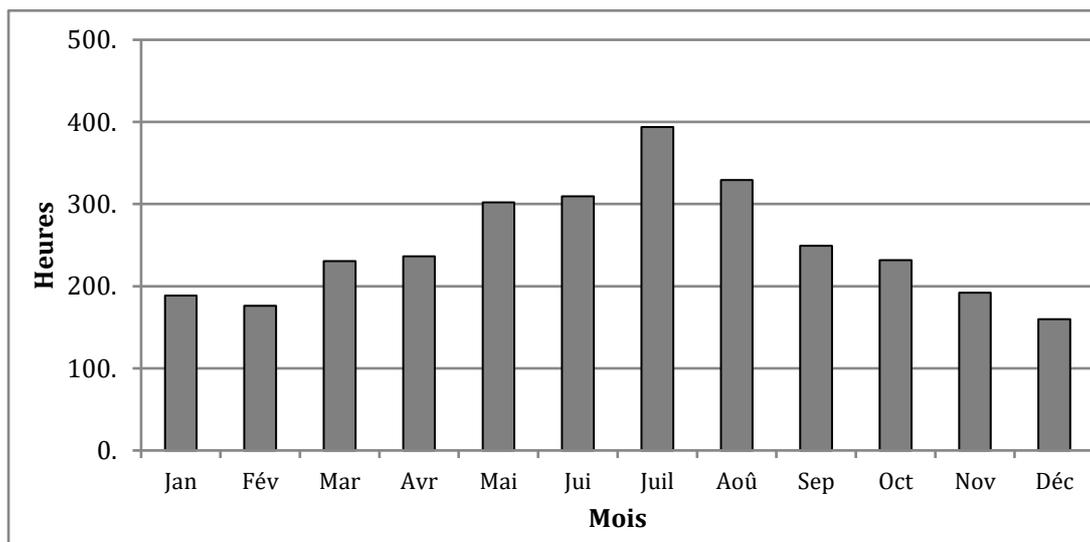


Figure 37 : Moyennes mensuelles en heures de la durée d'insolation dans le Grand-Tunis de la période 2005-2008. (Source des données : INM)

À l'échelle annuelle et durant la période 2005-2008, la durée de l'insolation a été inférieure à la normale de la période (247 h) durant les années 2005 et 2007, avec respectivement 237 h et 244 h. Cependant, les années 2008 et 2006 ont été plus ensoleillées que la normale avec respectivement 255 h et 253 h.

La moyenne de la nébulosité dans le Grand-Tunis est de l'ordre de 3,5 octas par jour (Charfi, 2004) sur la période 1950-2000.

Le ciel de l'été est le plus dégagé de l'année. Cette saison estivale est dominée par des taux de nébulosité inférieurs à 50 % (75 % du total des situations de la saison). À

l'opposé, c'est en hiver que le ciel est le plus couvert : 59 % des observations dépassent une nébulosité de 50 %. Pendant les intersaisons, les caractéristiques de nébulosité se ressemblent, elles sont supérieures à 50 % dans 59 % des cas en automne et dans 52 % au printemps (Fig. 38).

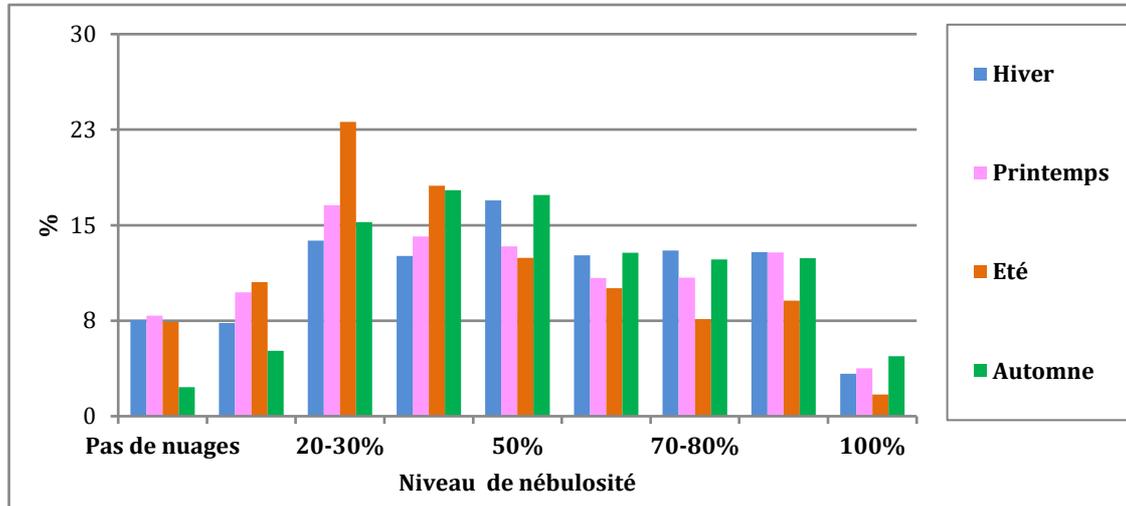


Figure 38 : Fréquence de la nébulosité à partir des observations tri-horaires de la période 2005-2011. (Source des données : Weather Underground).

IV. 4. L'HUMIDITE : CARACTERISTIQUES ET EFFETS SUR LA SANTE ET SUR LA QUALITE DE L'AIR

L'être humain est moins sensible à l'humidité qu'à la température. Néanmoins, l'humidité de l'air est essentielle dans la vie de l'Homme car elle est une des nombreuses composantes de l'air que nous respirons. Mais, elle peut affecter notre qualité d'air et notre santé dépendamment de sa quantité et son pourcentage dans l'air.

IV. 4. 1. L'humidité intérieure

La bibliographie médicale insiste plus sur l'humidité intérieure que sur l'humidité extérieure, pour l'effet sur la santé respiratoire. À l'intérieur d'un bâtiment, il ne devrait pas y avoir trop de condensation/ humidité, car avec le temps, l'humidité finit par endommager les matériaux de construction et les revêtements de finition, les composantes structurales en bois et la peinture... La détérioration de ces derniers peut à son tour provoquer l'apparition de moisissure qui pourrait être nocive pour la santé des occupants. « Santé Canada » recommande de maintenir un taux d'humidité relative compris entre 30 % et 55 % à l'intérieur d'un bâtiment et ce durant toute l'année. De ce fait, un air ambiant à l'intérieur d'un bâtiment, avec un taux d'humidité relative trop élevé, pourrait engendrer des problèmes de santé pour les occupants. Les recommandations relatives à l'humidité relative de l'air intérieur varient d'un pays à l'autre. La norme « ASHRAE 55 » spécifie que pour minimiser la possibilité d'inconfort due à une basse humidité relative, la température du point de rosée ne doit pas être inférieure à 2,8°C. Ceci correspond à une humidité relative de 30 % à 21°C. La limite supérieure du point de rosée est fixée à 16,7°C, ce qui correspond à une humidité relative de 76 % à 21°C. L'administration britannique de la santé et la sécurité

recommande une humidité relative située entre 40 et 70 % sur le lieu de travail. Aux températures élevées, l'humidité relative doit se situer au bas de cette échelle. De manière analogue, l'OSHA, l'administration américaine de la sécurité et de la santé, recommande le maintien de l'humidité de l'air intérieur entre 20 et 60 % (VAISALA, 2010).

IV. 4. 2. Les fluctuations de l'humidité relative extérieure

La zone de confort de l'être humain se situe approximativement entre 30 et 60 % d'humidité relative. La variation brusque de l'hygrométrie constitue également un facteur de risque pour les pathologies respiratoires notamment l'asthme. Rivolier (1972) retient qu'une variation de 30 % de l'humidité relative en 3 heures pourrait être nocive pour la santé humaine. Il retient qu'une variation de 30 % de l'humidité relative en 3 heures pourrait être nocive pour la santé humaine.

Les données de la variabilité de l'hygrométrie seront mises en relation avec les données quotidiennes de crises d'asthme admises aux urgences de Ben Arous durant la période juin-décembre et les données des urgences La Rabta durant l'année 2009.

Entre les mois de juin et de décembre 2011, les variations tri-horaires de l'hygrométrie de 20 % et plus, sont plus élevées durant la saison froide (octobre-décembre) avec 15 variations au sens de la baisse contre 13 au sens de l'augmentation. Durant la saison chaude (juin-septembre) les variations brusques de l'hygrométrie sont faibles avec 7 au sens de l'augmentation et 6 au sens de la baisse (Tab. 15).

Tableau 15 : variation de l'humidité relative trihoraire de 20 % et plus de la période (juin-décembre 2011). (Sources des données : INM).

Période tri-horaire	Saison chaude (juin-septembre)		Saison froide (octobre-décembre)	
	Sens de la variation		Sens de la variation	
	+	-	+	-
1h-4h	0	4	3	1
4h-7h	0	2	2	2
7h-10h	0	0	0	5
10h-13h	2	0	5	2
13h-16h	5	0	1	4
16h-19h	0	0	2	1
19h-22h	0	0	0	0
Total	7	6	13	15

(+) : Elévation de l'humidité relative de l'air.

(-) : Baisse de l'humidité relative de l'air.

CONCLUSION

L'étude des paramètres climatiques extrêmes dans le Grand-Tunis, durant la période 2005-2011, selon les seuils extrêmes absolus permet de déduire que :

- Les ambiances climatiques chaudes sont plus fréquentes dans le Grand-Tunis que les ambiances froides. La saison à risque à grande chaleur s'étend du mois de mai au mois d'octobre. Juillet et août présentent les mois à plus haut risque d'occurrence de

paroxysme de chaleur, ils détiennent les plus grands pourcentages de jours chauds ($T_{min} + T_{max} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 33^{\circ}\text{C}$) avec respectivement 39 % et 35 % du total des jours chauds pendant les 7 années d'étude. Comme à l'échelle internationale, l'année 2009 a été très chaude avec 67 de jours chauds. Cette année-là a enregistré une vague de chaleur exceptionnelle par sa durée (du 6 au le 30 août 2009) et son poids (156°C) ;

- L'hiver (janvier, février et décembre) est la saison à risque de froid. L'hiver tunisois est généralement frais ($15^{\circ}\text{C} \leq T_{min} + T_{max} \leq 25^{\circ}\text{C}$). L'année 2005 est considérée comme l'année la plus froide de la période d'étude avec 9 jours froids ($10^{\circ}\text{C} \leq T_{min} + T_{max} \leq 14^{\circ}\text{C}$). La plus grande vague de froid enregistrée a été d'une vingtaine de jours successifs du 25 au 30 janvier 2005 ;

- Les vents dans le Grand-Tunis, à l'échelle annuelle et mensuelle, sont majoritairement modérés (2 à 4 m/s). Ils soufflent généralement du secteur N, NNE, E et ESE, tandis que les vents forts (vitesse supérieure ou égale à 8 m/s) sont rares. Les situations calmes (vitesse de 0 à 1 m/s) sont plus fréquentes au mois de janvier, octobre et novembre, tandis que les mois très venteux (vitesse supérieure à 5 m/s) sont mars, avril, mai, juin et juillet.

Ce sont les épisodes météorologiques extrêmes, notamment les vagues de froid et de chaleur ainsi que les vents forts, qui représentent le risque le plus élevé pour la santé respiratoire particulièrement pour les personnes malades ou fragiles. Pour l'humidité, intérieure comme extérieure sont importantes pour la santé respiratoire. Si le niveau de l'humidité intérieure est préfixé selon des normes internationales dépendant d'un local à un autre, pour l'humidité extérieure, c'est la variation brusque de l'hygrométrie qui constitue le facteur de risque pour les pathologies respiratoires notamment l'asthme. Rivolier (1972) retient qu'une variation de 30 % de l'humidité relative en 3 heures pourrait être nocive pour la santé humaine. Selon notre observation, une fluctuation tri-horaire de 29 % a été suffisante pour déclencher une crise d'asthme, dans le Grand-Tunis, notamment dans le sens de la baisse.

Conclusion de la première partie

Le Grand-Tunis présente un contexte de vie urbaine qui la distingue des autres régions du pays et dont les particularités peuvent influencer la santé des résidents sous plusieurs aspects. Pour cela, nous avons présenté la zone d'étude en insistant sur ses particularités et sa complexité aussi bien à l'échelle de l'environnement physique qu'à celle des caractéristiques climatiques.

À partir des résultats de l'étude des facteurs de risque météorologique sur la santé respiratoire, le Grand-Tunis sur la période d'étude (2005-2011) n'a pas été épargné des situations atmosphériques extrêmes, que ce soit pour les fortes chaleurs, les basses températures, l'humidité relative extrême de l'air ou le vent qu'il soit inexistant (phase de pollution de l'air) ou très fort. L'impact sur l'état de santé est évident pendant ces épisodes de temps extrêmes. Reste que les conditions atmosphériques au niveau de la couche limite sont tributaires des conditions de surface. La morphologie, les aspérités de la nature de surface définies par le relief, la végétation ou par les diverses constructions humaines modifient en effet le comportement des variables météorologiques et aérologiques.



Partie II

Situation météorologique, temps et pollution de l'air dans le Grand-Tunis

Dans cette deuxième partie, l'un de nos principaux objectifs est d'inventorier et de caractériser les principales sources de pollution dans le Grand-Tunis, de procéder à l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux occasionnés par ces sources de pollution.

Dans un premier chapitre, nous allons présenter la pollution atmosphérique, le choix des polluants à étudier et leurs normes. Nous étudions les dépassements des normes tunisiennes relatives à chaque type de polluant et nous chercherons l'impact des paramètres climatiques et les types de temps sur les fortes concentrations de ces polluants. Ce fait exige, en plus de l'assimilation des facteurs de variabilité spatiale et temporelle de la pollution atmosphérique, une connaissance des sources et des types de polluants émis dans le Grand-Tunis, ainsi que l'environnement des stations de mesure de la qualité de l'air. Dans le second chapitre, nous montrerons les facteurs qui jouent sur la pollution atmosphérique au niveau de l'accumulation ou de la dispersion des polluants. Les deux derniers chapitres focalisent sur l'impact des paramètres météorologiques sur les fortes concentrations des polluants O_3 et PM_{10} et les types de temps associés. Nous commenterons les dépassements des seuils limites relatifs à la santé et les seuils d'alerte tunisiens des polluants problématiques dans les différentes stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis. Notre intérêt pour ces seuils est justifié par les effets néfastes sur la santé en cas de dépassement : le seuil limite relatif à la santé s'adresse aux personnes sensibles et le seuil d'alerte à toute la population. Ce seuil peut être un indicateur de dégradation de l'environnement et justifie l'intervention d'urgence pour protéger la population.

Chapitre V : Pollution atmosphérique dans le Grand-Tunis : sources, réglementations et stations de mesure

La pollution atmosphérique soulève une importante question de santé publique et entraîne des risques majeurs pour la santé des populations et la salubrité de l'environnement. Ce chapitre sera consacré à définir de la pollution atmosphérique et les polluants à étudier. Nous présentons le réseau de surveillance de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis et les caractéristiques de l'environnement des stations de mesure ainsi que les normes tunisiennes relatives aux polluants problématiques.

V. 1. DEFINITIONS, SOURCES ET REGLEMENTATIONS DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Il convient tout d'abord de définir la pollution atmosphérique et de présenter les facteurs influents sur la variabilité dans le temps et dans l'espace des polluants et enfin présenter les réglementations de la pollution atmosphérique en Tunisie et les comparer avec ceux de l'OMS.

V. 1. 1. Définitions

La pollution atmosphérique ou pollution de l'air est définie, par la commission du conseil de l'Europe, en février 1967, par : « *toute substance étrangère ou dont la variation du taux dans l'atmosphère est susceptible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, de provoquer un effet ou de créer une nuisance ou une gêne* » (CEC, 1991).

Dans son ouvrage intitulé « La pollution atmosphérique », Mouvier (1994) précise qu'il y a pollution de l'atmosphère, dans le cas où une variation de la composition de l'air modifie suffisamment ses propriétés physiques ou chimiques pour être détectable par les occupants du milieu.

La société d'ingénierie de l'environnement et de l'énergie à Tunis (1995) définit la pollution comme : « une émission dans l'atmosphère des particules solides, liquides ou de gaz corrosif, toxique ou odorant de nature à incommoder la population et à compromettre la santé ».

La pollution atmosphérique signifie donc la présence indésirable d'impuretés dans l'air ou aussi l'élévation exceptionnelle de la proportion de certains constituants dans l'atmosphère qui engendre des effets délétères sur l'environnement et surtout sur la santé humaine.

Les polluants sont : « *des substances présentes en concentrations suffisantes pour produire un effet sur l'homme, les animaux et les métaux* » (Mouvier, 1994). Pour les pathologies respiratoires, les polluants sont de trois types naturels : pneumallergènes, chimiques et biologiques. Les pneumallergènes, c'est-à-dire des antigènes sont présents dans l'air

ambiant, comme les pollens de graminées, d'arbres, de plantes aromatiques et d'herbacées diverses ainsi que les acariens. Les polluants chimiques sont comme le SO₂, les NO_x, l'O₃, les COV (composées organiques volatiles)... Et enfin, les polluants biologiques sont représentés par les bactéries et leurs endotoxines, des moisissures, des parasites (Cicolella, 2008).

V. 1. 2. Les sources d'émissions de la pollution atmosphérique dans le Grand-Tunis

Le Grand-Tunis est l'agglomération la plus peuplée de Tunisie. Il représente aussi, le premier pôle industriel du pays et comporte d'importantes zones industrielles représentant un risque certain pour la population tunisoise. En plus de la pollution atmosphérique causée par l'industrie, le rôle du trafic routier est très important. Les sources des polluants sont de deux types : fixes et mobiles.

V. 1. 2. 1. Les principales sources fixes des polluants dans le Grand-Tunis

Plusieurs industries émettrices de polluants atmosphériques sont répertoriées dans le Grand-Tunis, un grand nombre d'entre elles sont fortement polluantes. Ces usines se rencontrent surtout à l'est et au centre de l'agglomération. Les secteurs d'activités représentés par ces usines sont : ciment, agroalimentaire, chimie, etc.

Ces sources industrielles fixes, les plus polluantes, selon la position géographique (Fig. 39), sont :

Jbal Jloud : les Cimenteries Artificielles Tunisiennes (CAT) est la première cimenterie installée en Tunisie, elle fut fondée en 1932 à Jbal Jloud, au sud du gouvernorat de Tunis et à deux km seulement du centre ville de Tunis. Elles constituent avec les carrières éparpillées une source très importante de poussières. Parmi les polluants importants rejetés par la cimenterie nous comptons les différents gaz de combustion au niveau des fours de cuisson : le SO₂, le NO_x, le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂) et surtout les poussières qui sont très ressenties par la population pour des raisons physiologiques et psychologiques (DGAT, 2010, A ; CITEPA, 2015).

Ben Arous-Bir Elkassaa : la zone industrielle Ben Arous-Bir Elkassaa, est le plus ancien pôle industriel de Tunisie, les unités industrielles couvrent toutes les activités : l'agro-alimentaire, les matériaux de construction céramiques, le verre, le textile, l'électromécanique, le cuir et la chaussure (DGAT, 2010, A).

Mégrine : parmi les institutions industrielles polluantes à Mégrine, nous citons :

- la Société Tunisienne d'Engrais Chimique, qui produit des engrais et des pesticides ;
- l'usine de liège : par sa pollution gazeuse et particulaire et ses odeurs nauséabondes, elle présente une gêne pour la population ;
- la Société SICOAC (Société Industrielle des Conduites et Accessoires) qui fabrique les tubes de canalisation et les tôles ondulées en amiante et en ciment. Les poussières d'amiante dégagées constituent le polluant particulaire le plus dangereux ;
- les usines de fabrication des accumulateurs : telles que Nour et Assad, dégagent essentiellement les vapeurs acides et les poussières d'oxydes de plomb ;

- la SOTUVERRE de Mégrine : la fusion de la matière première nécessite des grandes quantités de fuel lourd. La combustion de fuel à forte température dégage un certain nombre de polluants gazeux par la cheminée ;

- la société Fonderies Réunies de Mégrine : c'est une usine polluante qui dégage essentiellement des fumées noires chargées de particules fines (DGAT, 2010, B ; AUGT, 2010).

Echarguia : dans cette zone industrielle, les rejets atmosphériques sont essentiellement ceux des petites cheminées des chaudières au fuel lourd ou des poussières des usines de fabrication de carrelage et des marbreries (DGAT, 2010, C).

Ksar Saïd et Oued Ellil : les principales sources de pollution sont issues surtout des usines agro-alimentaires.

La Goulette-Radès port : c'est le second pôle industriel après celui de Ben Arous du point de vue de la pollution atmosphérique. Les principales institutions sont la centrale thermique de Radès, les ports de Radès et de la Goulette et les unités de stockage d'hydrocarbures de Radès port (DGAT, 2010, A).

Le secteur de la briqueterie est considéré parmi les industries qui génèrent le plus de nuisances. Des émanations d'effluents gazeux sont générées par les fours lors de la cuisson des produits rouges. Il y a les grandes et les moyennes briqueteries dont les fours fonctionnent à base de fuel lourd (à 4 % de soufre) et les briqueteries traditionnelles qui utilisent le grignon comme combustible. Ces usines sont situées essentiellement aux environs de l'Ariana (APPE, 2012).

La localisation des établissements industriels dans le Grand-Tunis est proche des espaces urbanisés ce qui peut avoir un impact sur la vie des populations situées à proximité.

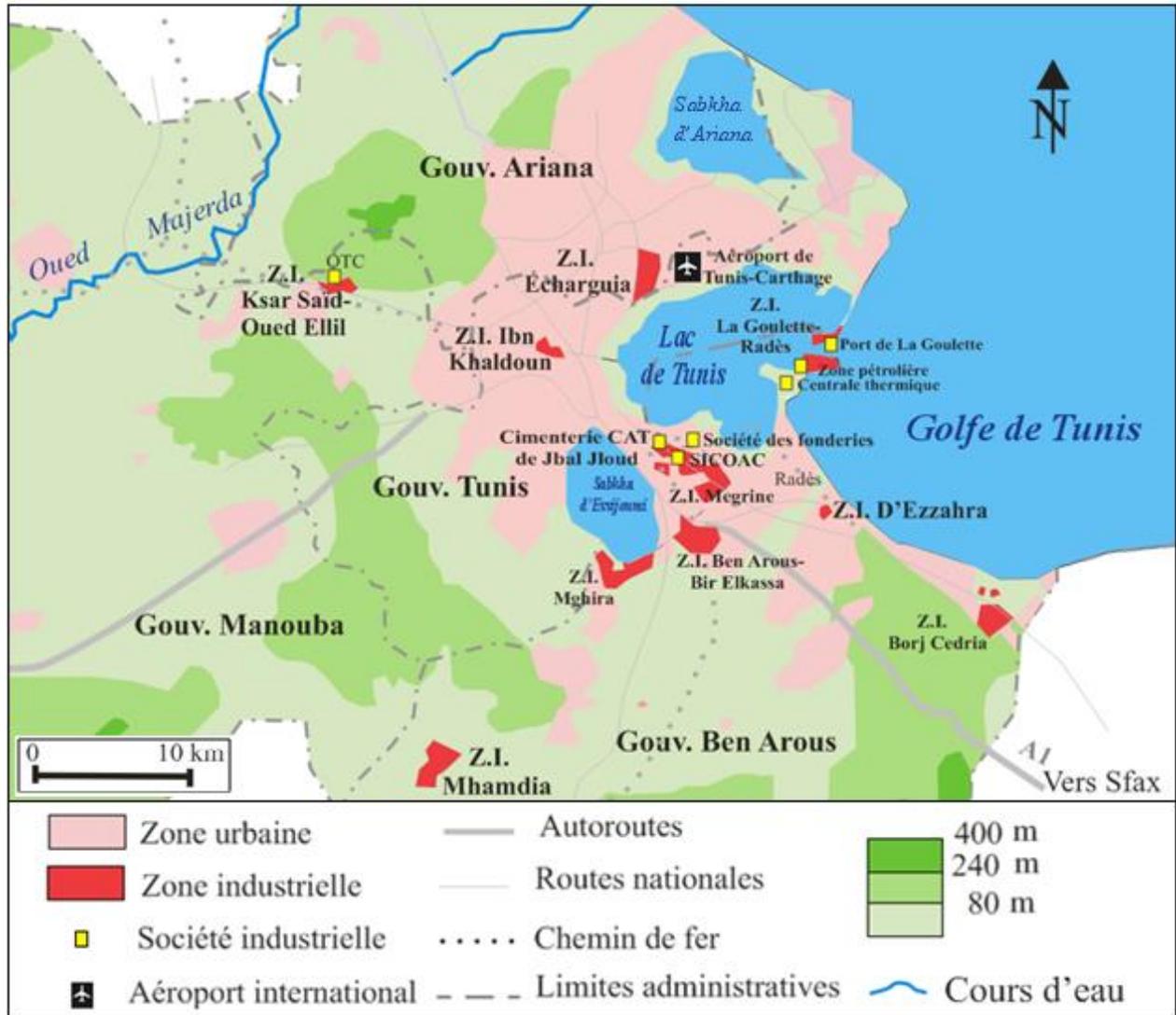


Figure 39 : Localisation des zones industrielles dans le Grand-Tunis. (Réalisation : Ben Romdhane S., source des données : carte topographique 1/200 000 de Tunis et DGAT, 2010, A, B et C).

V. 1. 2. 2. Les sources mobiles de la pollution de l'air

Le transport est l'un des secteurs les plus importants d'émission de polluants. Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux informations relatives au parc de véhicules et aux différentes flottes de transport maritime, aérien et ferroviaire ainsi qu'aux quantités et qualités des différents carburants utilisés en Tunisie, et spécifiquement dans le Grand-Tunis.

V. 1. 2. 2. 1. Le trafic automobile

Importance de la voiture dans la vie des tunisois

La circulation dans le Grand-Tunis a connu, au cours de la dernière décennie, d'innombrables mutations liées au développement considérable de l'agglomération. Liée aussi à la politique de modernisation du parc mise en œuvre par le gouvernement

tunisien, qui laisse présager d'un rajeunissement rapide du parc en raison de la libéralisation des importations et l'allègement des droits de douane.

Une étude récente réalisée par l'Ambassade de France à Tunis montre qu'une famille sur cinq possède une voiture en Tunisie. Cette étude, qui a pour but d'analyser les tendances du marché automobile en général, révèle que malgré les hausses de prix des hydrocarbures, les tunisiens sont friands de voitures. C'est ce que confirme le développement considérable du parc automobile dans le Grand-Tunis.

En effet, le parc des véhicules particuliers dans le Grand-Tunis représente 40 % du parc national (El Melki, 2008 B). En décembre 2009, le parc automobile dans le Grand-Tunis comptait environ 550 000 véhicules (ATTT, 2011). Selon le responsable de l'agence technique du transport terrestre (ATTT), 75 % du parc fichier est un parc circulant. Les camionnettes et les voitures ont fortement augmenté entre 2005 et 2009 (Annexe IV).

Le transport individuel par véhicules légers (dont principalement les voitures particulières) est le mode le plus utilisé, suivi des moyens de transport collectif routiers (bus publics et privés) et ferroviaires (métro léger et trains de banlieue).

Etat du parc automobile dans le Grand-Tunis

Les principaux polluants émis par les moteurs des véhicules dépendent de certaines facteurs, comme l'état du parc des véhicules (type, puissance, âge), la consommation du carburant et sa nature ainsi que l'état du trafic dans les villes (Chabbi et Abid, 2008).

Les combustibles les plus consommés par les moyens terrestres de circulation sont l'essence et le diesel qui est plus reconnu en Tunisie sous le nom de « gaz oil ». Ils représentent respectivement 53 % et 46 %, tandis que le reste des carburants (ESS-Gaz GPL, électricité...) ne représentent ensemble que 1 % du total des consommations d'énergie (Fig. 40).

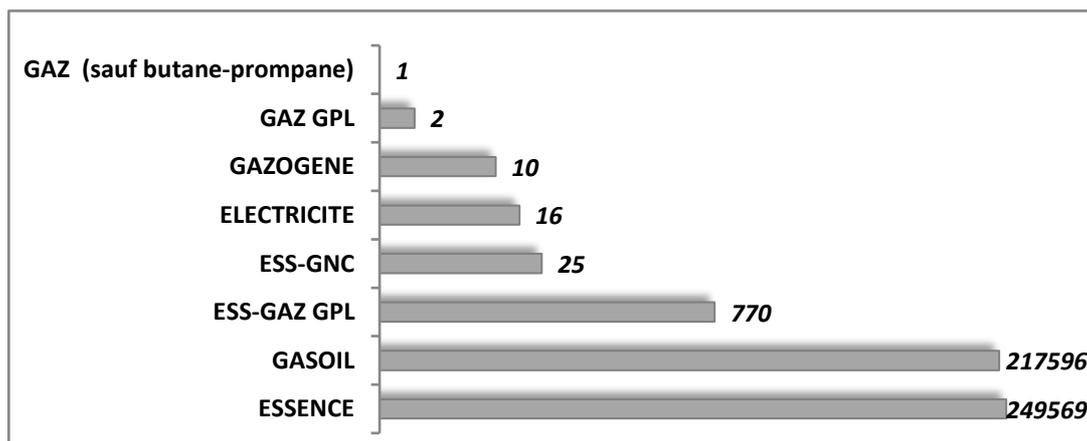


Figure 40 : Nombre de véhicules dans le Grand-Tunis par type d'énergie utilisé. (Source des données : ATTT, 2010).

Le moteur à essence séduit plus les automobilistes tunisois que celui au diesel, à l'achat il est moins cher que le moteur diesel malgré que ce dernier consomme 15 % de carburant de moins. Du côté pollution, les deux motorisations sont polluantes mais

chacun de sa manière. Le moteur diesel émet beaucoup d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules fines à travers ses fumées noirâtres. Quant au moteur essence, il rejette plus de monoxyde de carbone (CO), de gaz carbonique et d'hydrocarbures imbrûlés (notre-planete. Info et wikipedia.org). Le tableau suivant (Tab. 16) présente une comparaison entre les caractéristiques des deux types de moteurs essences et diesel.

Tableau 16 : Un comparatif généraliste des principales caractéristiques des moteurs essence et gaz oïl. (Source : *Quelleautomobile.fr. Consulté en 2014*).

Moteur	Prix d'achat	Carburant	Entretien	Pollution	Autonomie	Consommation
Essence	Moins cher	Plus cher	Moins cher	Importante	Assez bonne	Moins bonne
Gaz oïl	Plus cher	Moins cher	Plus cher	Très importante	Bonne	Bonne

Les principaux polluants atmosphériques émis par les moteurs des véhicules et mesurés sont : CO₂, CH₄, NO_x, CO, COV et SO₂. Il ressort du tableau 17 que le Grand-Tunis détient la grande part des polluants atmosphériques dégagés par les moteurs des véhicules en 2006, notamment les NO_x et les COV, principaux polluants pour la formation d'O₃ avec respectivement 55 % et 46 % du total national.

Tableau 17 : Emissions des polluants par les moteurs des véhicules, en Tunisie et dans le Grand-Tunis, en 2006. (Source des données : ANME).

Polluant	CO ₂	CH ₄	NO _x	CO	COV	SO ₂
Grand-Tunis	1968,8	0,3	27,1	125,6	18,3	3,4
Total national	4775,2	0,7	49,3	202,6	39,8	7,3
La part du Grand-Tunis (%)	41,2	37,1	55,0	62,0	46,0	46,6

Les vieux véhicules dégagent plus de polluants atmosphériques. D'après les données de l'ATTT, 54 % du Parc automobile dans le Grand-Tunis est relativement jeune, âgé de moins de 6 ans, 13 % sont âgés de 6 à 10 et 33 % sont âgés de plus de 11 ans (Fig. 41 et Annexe V).

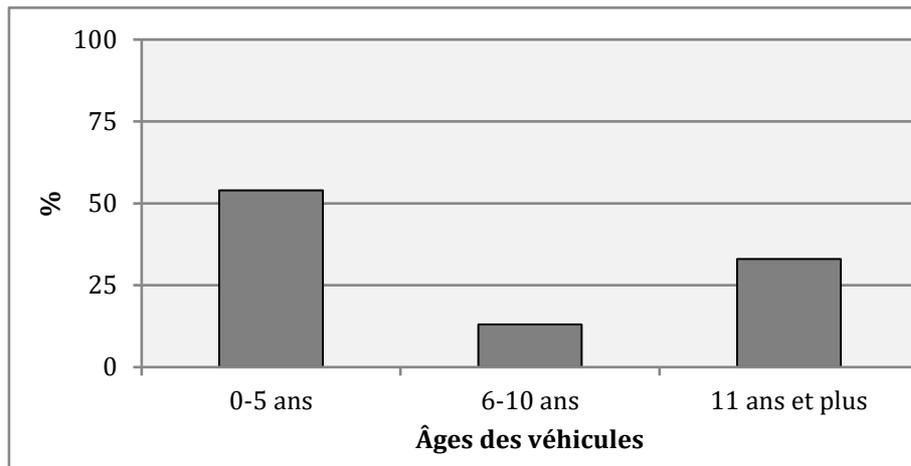


Figure 41 : Répartition du parc automobile dans le Grand-Tunis selon l'âge en 2009.
(Source des données : ATTT).

Les caractéristiques du réseau routier dans le Grand-Tunis

La caractéristique majeure du réseau routier dans le Grand-Tunis est la dominance des routes radiales. Tunis est le point de convergence des routes radiales reliant la capitale au reste du territoire national. S'agissant pour la plupart de routes classées à caractère national, la majorité de ces routes se prolongent pour atteindre d'autres régions du pays. Le transport urbain prend lui toutes les formes : métro, rail, bus, automobile, camion, voiture (Fig. 42).

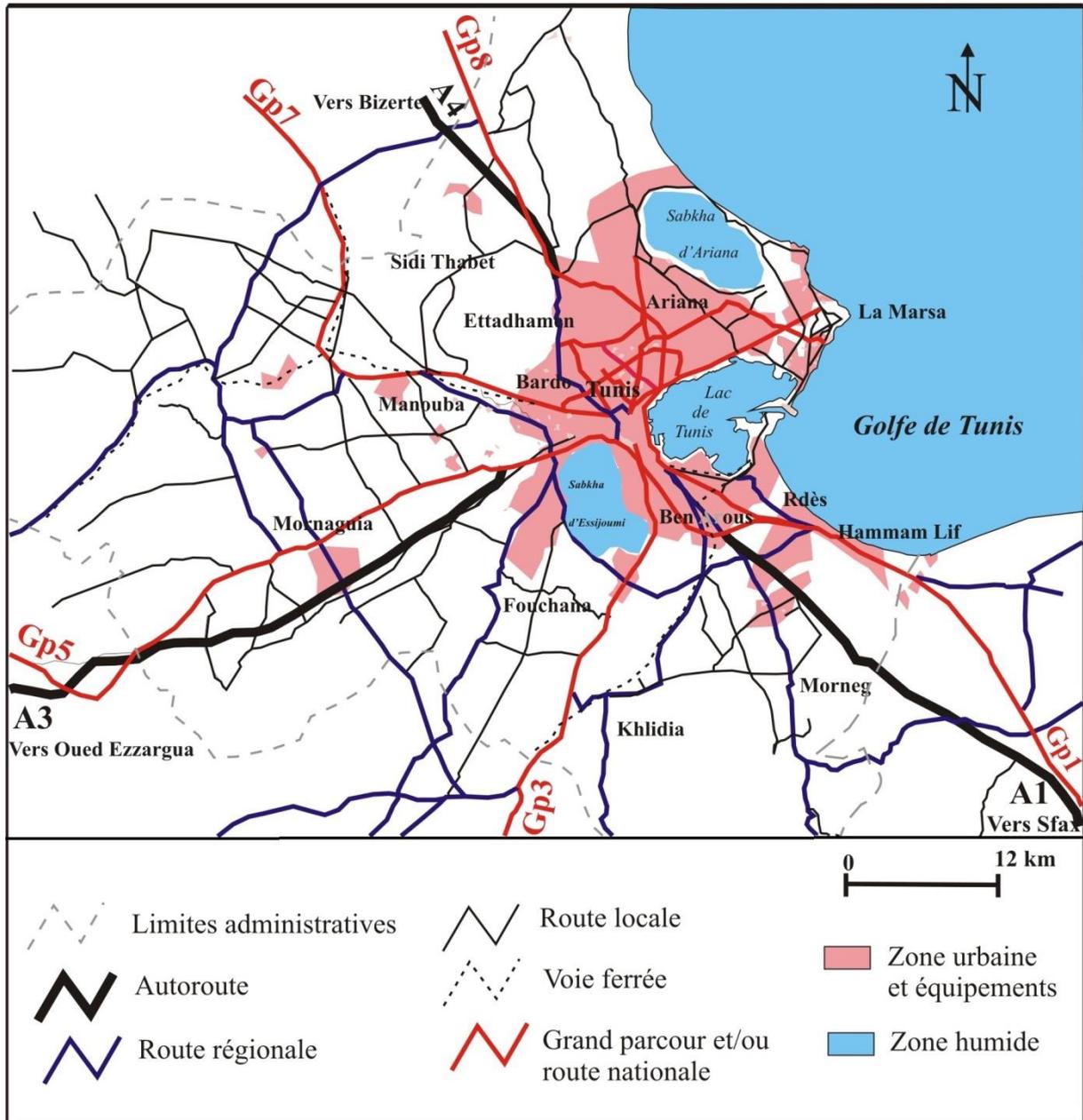


Figure 42 : Carte du réseau routier des voies ferrées dans le Grand-Tunis.). (Réalisation : Ben Romdhane S. ; adapté de la carte routière du Grand-Tunis, AUGT, 2010).

Le gouvernorat de Tunis, notamment la capitale, constitue le plus grand pôle d'attraction du trafic automobile et spécialement les véhicules privés, car il représente une grande concentration des habitants et des activités économiques. Le gouvernorat de Tunis représente 44,6 % du débit journalier moyen des véhicules du Grand-Tunis en 2007, suivi par les gouvernorats de Ben Arous (25,1 %), Ariana (22,5 %) et enfin La Manouba (7,8 %) (MTE, 2013) (Fig. 43).

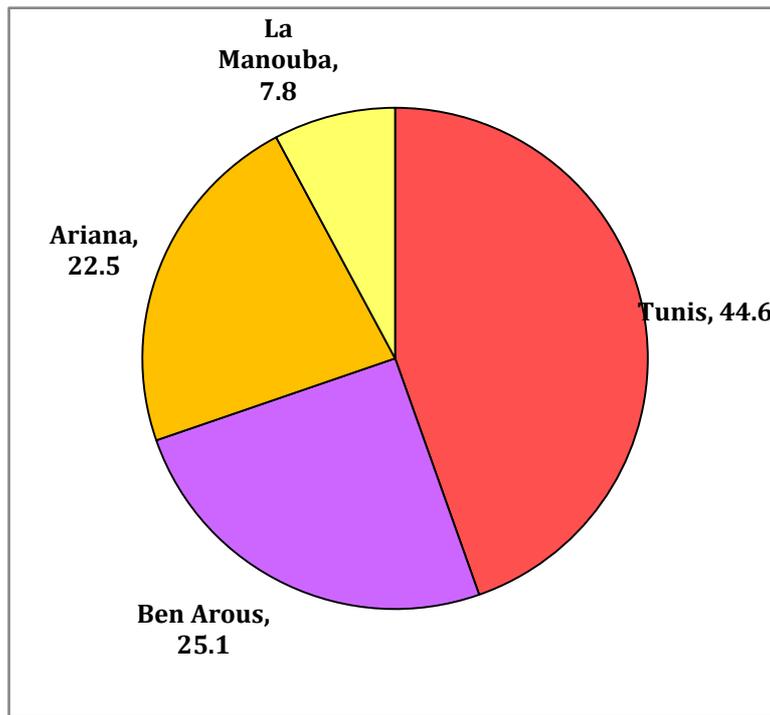


Figure 43 : Part du débit journalier moyen, en %, des véhicules dans les gouvernorats en 2007 en %. (Source des données : MEHAT-DGPC, 2010).

Le réseau routier de Tunis s'organise autour de quatre principaux axes qui relient le gouvernorat au reste du pays et sur lesquels se greffent des axes de liaisons infrarégionales et des tronçons de routes assurant l'accessibilité aux différentes localités du gouvernorat. L'intensité du trafic routier de Tunis se concentre essentiellement au nord et au sud au niveau des grandes zones industrielles, Echarguia et Jbal Jloud où le nombre journalier de véhicules peut atteindre 160 000 véhicules (Fig. 44).

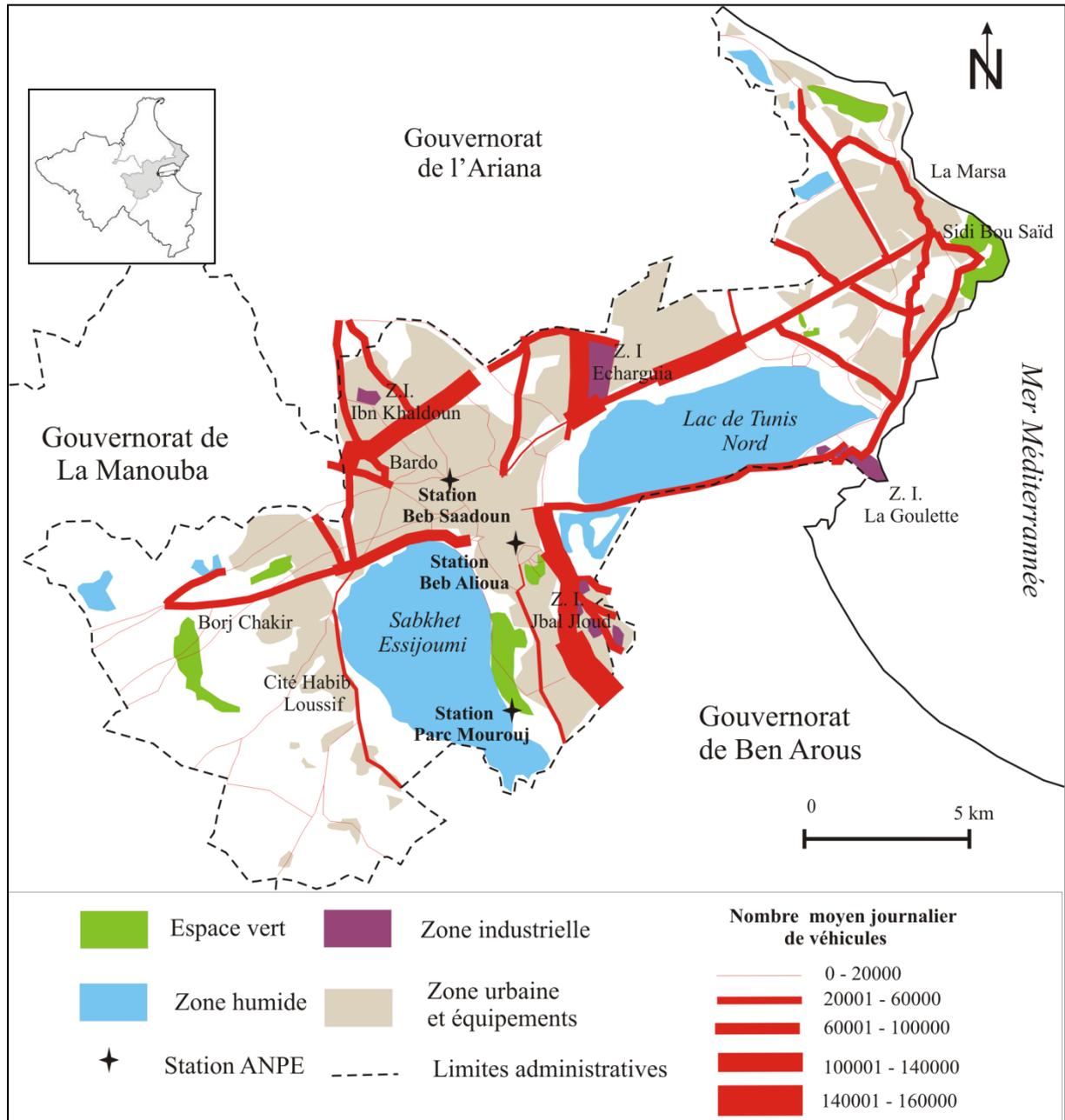


Figure 44 : Réseau routier dans le gouvernorat de Tunis et nombre moyen journalier de véhicules en 2007. (Réalisée par : Ben Romdhane S. ; Source des données : AUGTT et MEAT).

La forte pollution automobile dans le Grand-Tunis, conduit de façon récurrente à une population potentiellement exposée à des niveaux critiques de pollution atmosphérique. Tunis est le gouvernorat le plus exposé à la pollution automobile. Or il ne dispose que de deux stations de mesure de la qualité de l'air de type « proximité du trafic routier ».

V. 1. 2. 2. 2. Le trafic des navires

Le Grand Tunis détient les plus importants ports de la Tunisie, les ports de Radès et de La Goulette. En termes de trafic, le port de Radès est le plus grand. Il assure à lui seul

19% du trafic des marchandises, 90 % de l'activité conteneurs et environ 80 % de l'activité remorque dans le pays (OMMP, 2014). Le port de La Goulette est consacré au trafic des passagers, des véhicules et des marchandises générales, assuré par des ferries de lignes régulières (Marseille, Gênes, Naples...) et de croisières (MEDGAT, 2014).

Le trafic maritime, dans le Grand-Tunis, est passé de 41,9 % en 2002 à 37,1 % en 2009. Il reste important par rapport au trafic national, malgré la diminution (Ministère du Transport-DGMM, 2009) (Tab. 18).

Tableau 18 : Pourcentage du trafic des navires du Grand Tunis par rapport au total national du 2002 au 2009. (Sources des données : Ministère du Transport-DGMM. 2009).

Années	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Le trafic des navires dans le Grand Tunis	3017	2774	2925	3016	2997	3066	2945	2967
Total du trafic national des navires	7201	6849	6696	6859	7495	8124	8065	8005
La part du Grand-Tunis (%)	442	41	44	44	40	38	37	37

Le trafic maritime constitue aussi un grand risque de pollution atmosphérique. Les navires utilisent deux types de combustibles : le gaz oïlet le fuel pour le fonctionnement des chaudières. Ils rejettent dans l'atmosphère des PM, des NO_x et des SO₂. L'Organisation Maritime Internationale (OMI, 2010) estime que les émissions de CO₂ du transport maritime international ont atteint 1120 millions de tonnes de CO₂ en 2007. Aucune étude n'évalue précisément les émissions dégagées par ce trafic dans le Grand-Tunis.

V. 1. 2. 2. 3. Les feux de végétation

« La pollution par les fumées résultant des feux de végétation, soulève une importante question de santé publique et entraîne des risques majeurs pour la santé des populations et la salubrité de l'environnement » (Clément *et al.*, 2004). Une combustion complète émet principalement du dioxyde de carbone, des particules et la vapeur d'eau, ainsi que dans de faibles quantités des NO_x, SO₂, des cendres, des métaux lourds, etc. Cependant, près des incendies, il n'y a pas de concentration d'O₃ élevée. Plusieurs milliers de malades sont liés aux composés dégagés par les incendies. La plupart des personnes affectées présentaient des problèmes respiratoires, des bronchites, de l'asthme... (Perriez *et al.*, 2003 ; Clément *et al.*, 2004 ; Benmarhnia *et al.*, 2013).

Devant l'ampleur des effets sanitaires et environnementaux des feux de végétation, il paraît nécessaire d'avoir une idée sur leur fréquence dans notre espace d'étude, afin de détecter la région la plus touchée et la saison à risque. Selon la base de données fournie par l'INRGREF, entre 2005 et 2010, environ 335 incendies ont été enregistrés dans le

Grand-Tunis, soit 28 % du total national. En effet le Grand-Tunis fait partie des gouvernorats à risque pour les feux de végétation. Le gouvernorat de Ben Arous représente le risque le plus élevé avec 39 % du total suivi par l'Ariana (31 %), Tunis (19 %) et enfin La Manouba avec 11 %.

Entre 2005 et 2010, 664 ha ont été touchés par les incendies dans le Grand-Tunis. Les années catastrophiques ont été 2007 et 2008 avec respectivement 422 ha et 102 ha parcourus. L'Ariana a été la plus touchée avec 274 ha car elle représente la surface la plus arborisée du Grand-Tunis notamment avec le grand espace vert du Parc Ennahli. Suivie par La Manouba (162 ha), malgré que ce gouvernorat enregistre le plus faible nombre d'incendies. Environ 129ha parcourus à Ben Arous qui a enregistré le plus grand nombre d'incendies (41 incendies) et enfin Tunis avec 98,38 ha et seulement 10 incendies (Fig. 45 et Tab. 19).

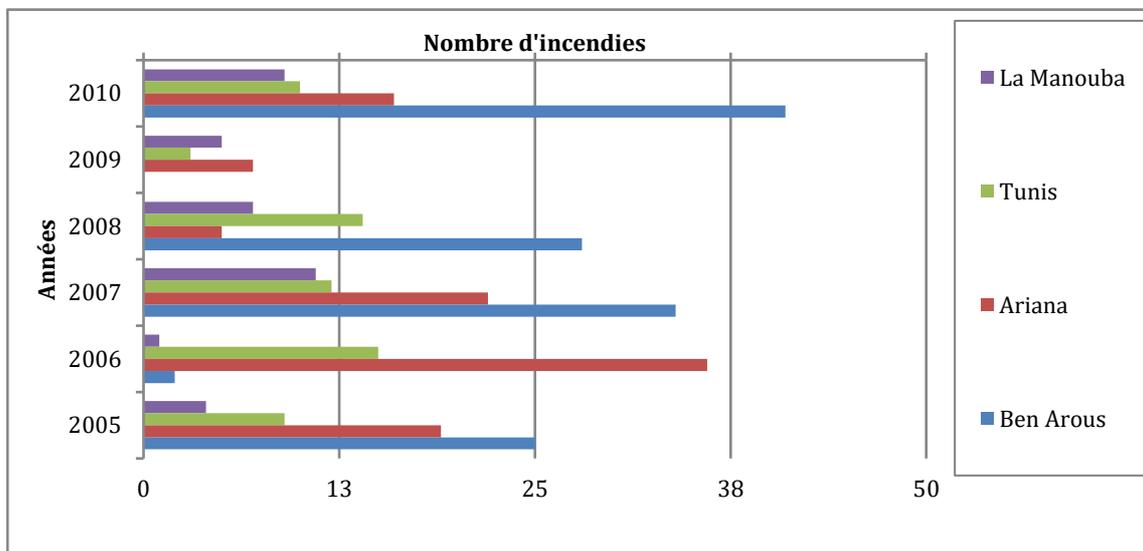


Figure 45 : Nombre d'incendies dans les gouvernorats du Grand-Tunis entre 2005 et 2010 (source de données : INRGREF).

Tableau 19 : Nombre d'hectares parcourus dans les gouvernorats du Grand-Tunis entre 2005 et 2010 (source de données : INRGREF).

Années	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total
Gouvernorat							
Ben Arous	7.8	1	107.1	9.53	0	4.5	129.93
Ariana	7.6	11.8	198.4	0.28	1.2	54.38	273.66
Tunis	3.98	1.9	85.2	1.6	1.54	4.16	98.38
La Manouba	22.57	0	30.9	91	0.27	17.32	162.06
Total	41.95	14.7	421.6	102.41	3.01	8.36	664.03

La période la plus propice au feu de végétation dans le Grand-Tunis est l'été avec 75 % du total des incendies, sous les effets conjugués de l'augmentation de la température, de la sécheresse et la faible teneur en eau du sol vient s'ajouter l'intervention humaine (Fig. 46). Plus le temps sera chaud, sec et venteux, plus la végétation sera sèche, plus le risque sera élevé (Perriez *et al.*, 2003).

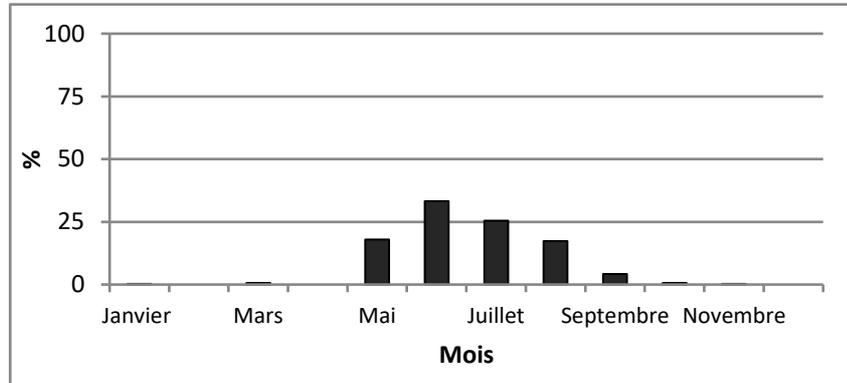


Figure 46 : Fréquence des feux de forêt dans le Grand-Tunis entre 2005 et 2010 (source des données : INRGREF).

La très grande majorité des incendies parcourent moins de 1 ha, soit 79 % du total des incendies contre 21 % qui dépassent 1 ha et arrivant même à 101 ha. Ces incendies sont d'origine naturelle ou anthropique, criminels ou aussi la conséquence d'une imprudence (mégot de cigarette, barbecue, brûlure des débris....). L'auteur de la majorité des incendies (61 % du total) reste méconnu.

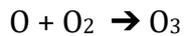
Le feu se déplace généralement dans le sens du vent et les flammes de bas en haut (des broussailles vers les houppiers des arbres). Mais le vent et le relief modifient souvent l'avancée des feux.

V. 2. LES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES PROBLEMATIQUES : O₃ ET PM₁₀

La liste des polluants atmosphériques est longue, dans cette étude nous en avons retenu deux parmi les plus affectant sur la santé respiratoire de l'homme et dont les données sont disponibles : l'ozone troposphérique (O₃) et la matière particulaire de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm : les PM₁₀. Bien que les polluants rencontrés dans l'air extérieur soient inhalés sous forme de mélange, les études expérimentales ont pu déterminer les effets spécifiques de chacun (Mouvier, 1994 ; Pène et Masse, 2009).

V. 2. 1. L'ozone troposphérique : O₃

L'ozone troposphérique est un polluant secondaire. Dans la troposphère, la principale cause de formation d'O₃ est la photolyse du dioxyde d'azote (NO₂) par le rayonnement solaire $h\nu$ à une longueur d'onde inférieure à 420 nm. L'efficacité de cette réaction est caractérisée par le taux de photolyse « j » qui est fonction de l'ensoleillement. Elle conduit au monoxyde d'azote (NO) et à l'oxygène monoatomique (O). Ce dernier en réagissant avec le dioxygène donne de l'ozone :



La pollution à l'O₃ est appelée « pollution photochimique » (CITEPA, 2015 ; Blin *et al.*, 2007). Cette pollution résulte de réactions chimiques dans l'atmosphère à partir des polluants primaires (NO_x et COV : précurseurs de cette pollution) en présence de rayonnement solaire (d'où le terme « photochimique » car cette pollution est initiée par des réactions photochimiques, c'est-à-dire de photolyse de molécules par le rayonnement solaire) menant à la formation de l'O₃ (Fig. 47 A). La formation de l'O₃ est contrebalancée par sa destruction par le monoxyde d'azote (NO). Cette réaction est très rapide et est souvent appelée réaction de « titration », c'est-à-dire qu'elle s'arrête quand l'un des deux réactifs (NO ou O₃) est épuisé (Fig. 47 B). Dans l'atmosphère en présence de rayonnement solaire, l'O₃ peut être continuellement régénéré par la photolyse de NO₂. Il s'ensuit un système de trois réactions qui se met à l'équilibre, donc les vitesses de ces trois réactions sont identiques (Seigneur *et al.*, 1983).

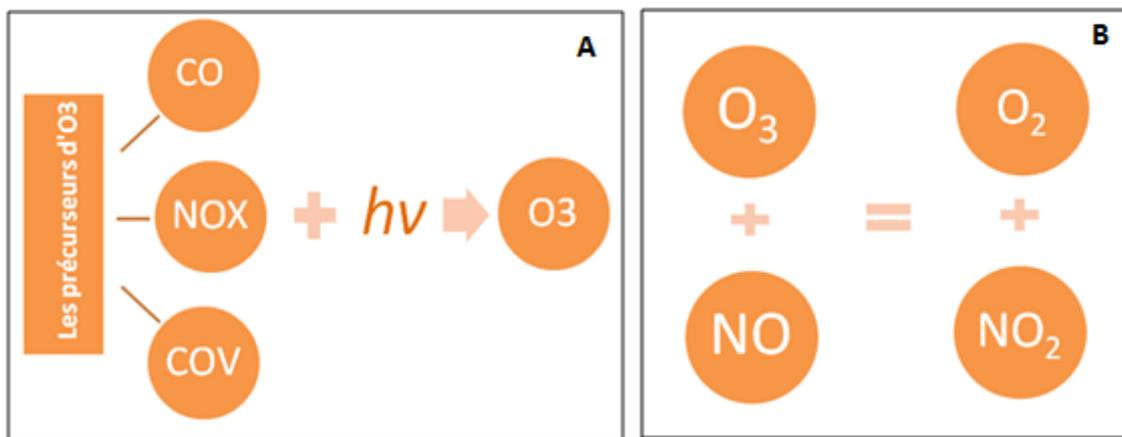


Figure 47 : Photogenèse (A) et destruction (B) d'O₃.

La formation d'O₃ a donc lieu le jour, en présence de rayonnement solaire. Cependant, son temps de vie chimique est de plusieurs heures, voire jours, et son action oxydante peut aussi avoir lieu la nuit (Seigneur *et al.*, 1983 ; Aumont, 2005).

V. 2. 2. Les particules en suspension (PM)

Les particules en suspension ne constituent pas une espèce chimique unique. Il s'agit d'un mélange complexe de composés chimiques en suspension dans l'air dont les origines sont diverses (Airparif, 2012).

Les particules atmosphériques sont de deux types : des particules « primaires » qui sont émises par des sources naturelles (érosion du sol, embruns...) ou anthropiques (véhicules à moteur, combustion de tout type...) et d'autre part de particules dites « secondaires » qui sont formées dans l'air par des processus chimiques complexes, en particulier à partir de précurseurs gazeux présents dans l'atmosphère (NO_x et NO₂, ammoniac, COV, etc.) (Pernelet-Joly, 2008).

Les particules en suspension ont des conséquences sur la santé qui sont fonction de leur taille. Dans cette étude, compte tenu des données disponibles, seules les PM₁₀ sont étudiées. Les PM₁₀ sont de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm. Les émissions

des PM10 proviennent de nombreuses sources, en particulier de la combustion de biomasse et de combustibles fossiles comme le charbon et les fiouls de certains procédés industriels et industries particulières (construction, chimie, fonderie, cimenteries...) de l'usure de matériaux (routes, plaquettes de frein...) de l'agriculture (élevage et culture), du transport routier... (Pernelet-Joly, 2008).

V. 3. LES REGLEMENTATIONS DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Les polluants peuvent avoir des effets en altérant, par leur interaction, des molécules essentielles aux processus biochimiques ou physiologiques du corps humain. Mais, à partir de quel niveau de concentration peut-on parler de pollution ?

V. 3. 1. Les recommandations de l'OMS de la pollution de l'air

L'OMS recommande des niveaux d'exposition au polluant (concentrations et durées) au-dessous desquels « *il n'a pas été observé d'effets nuisibles sur la santé humaine ou sur la végétation* ». Elle a défini trois seuils, qui sont déterminés sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs des polluants de l'air ambiant, sur la santé humaine ou sur l'environnement :

- **La valeur guide** : ou valeur cible, constitue l'objectif de qualité ou valeur de confort à atteindre, si possible, dans une période donnée.
- **La valeur limite** : ou niveau maximal de concentration de substances polluantes acceptable dans l'atmosphère (Air PACA, 2012).
- **Le niveau d'alerte** : est un seuil que les autorités considèrent comme un niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour le bien-être ou la santé de la population et justifiant l'intervention de mesures d'urgence (Airparif, 2012).

Les valeurs guides recommandées par l'OMS pour la pollution à l'O₃ sont de 150 à 200 µg/m³, en moyenne pendant une heure.

Le seuil d'information et de réglementation pour les PM10 est de 50 µg/m³, une moyenne journalière glissante à ne pas dépasser plus de 3 jours par année civile ; d'autre part, un seuil d'alerte de 20 µg/m³ à ne pas dépasser en aucun cas.

V. 3. 2. Les recommandations tunisiennes pour l'O₃ et les PM10

En Tunisie, la réglementation de la qualité de l'air se base aujourd'hui sur la loi de 1994 (norme tunisienne relative à la qualité de l'air : NT. 106.04, 1994). Les limites et les seuils d'alerte de la qualité de l'air sont fixés par décret, pris sur la proposition du ministre chargé de l'environnement et du ministre chargé de la santé publique. Ils sont sous forme de valeurs limites et des valeurs guides.

En Tunisie, les niveaux réglementaires fixés pour l'O₃ sont :

- **valeur guide** (relative au bien-être) : 150-200 µg/m³, en moyenne pendant une heure ;
- **valeur limite** (relative à la santé) : 235 µg/m³, en moyenne pendant une heure.
- **Le seuil d'alerte** est considéré comme atteint si la moyenne horaire de l'ozone dépasse les niveaux de pollution fixés par le seuil en question (valeur guide ou valeur limite) deux fois pendant une période de 30 jours.

Les normes tunisiennes relatives aux PM10 sont largement au-dessus des normes européennes. En effet, deux niveaux réglementaires ont été fixés :

- **Une valeur guide** (relative au bien-être) de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par jour (24h) ;
- **Une valeur limite** (relative à la santé) fixée à $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ par jour (24h).

Dans les deux cas, il s'agit d'une moyenne journalière à ne pas dépasser plus d'une fois par an. On doit donc admettre que, en dessous des valeurs guides et limites, les risques sont acceptables.

Nous remarquons que les normes de l'OMS sont très sévères par comparaison aux normes tunisiennes notamment pour les PM10. Ce que l'on sait des conditions de l'environnement en Tunisie en général et dans le Grand-Tunis en particulier, permet de dire que la pollution de l'air y était marquée. Ce qui fait courir à la population un risque accru de maladies respiratoires et autres problèmes de santé.

V. 4. LE RESEAU DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR DANS LE GRAND-TUNIS

En Tunisie, le suivi de la qualité de l'air, la prévention et la lutte contre la pollution atmosphérique sont assurés par le biais du Réseau National de Surveillance de la Qualité de l'Air (RNSQA). Et l'organisme surveillant la qualité de l'air est l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE). Les polluants mesurés sont le dioxyde de soufre, l'oxyde d'azote, les particules solides, le monoxyde de carbone et l'azote. Il y a huit stations de mesure de la qualité de l'air dans le Grand Tunis. Chaque gouvernorat en est doté d'au moins une.

V. 4. 1. Protocole de mesure

Le RNSQA possède des analyseurs qui mesurent les polluants en continu et le pas d'obtention des données est le quart horaire. Tous les analyseurs de gaz et de particules solides atmosphériques ainsi que les capteurs météorologiques sont interrogés à distance à l'aide d'un système d'acquisition et de transmission des données, le fonctionnement et le contrôle des différents appareils d'une façon automatique, autonome et continue. Ce poste informatique est équipé d'un système de télétransmission (modem), relié à l'ensemble des cabines et constitue le poste central national (PCN). Il est capable d'effectuer, à distance, les mêmes opérations de pilotage et de contrôle des analyseurs et d'assurer, en temps réel, l'acquisition des données quel que soit l'emplacement de stations de mesure. Le principe de mesure des polluants d'O₃ est la photométrie UV. Tandis que les PM sont mesurées par la méthode « jauge bêta » (ANPE, 2005) (Fig. 48, 49, 50 et 51).

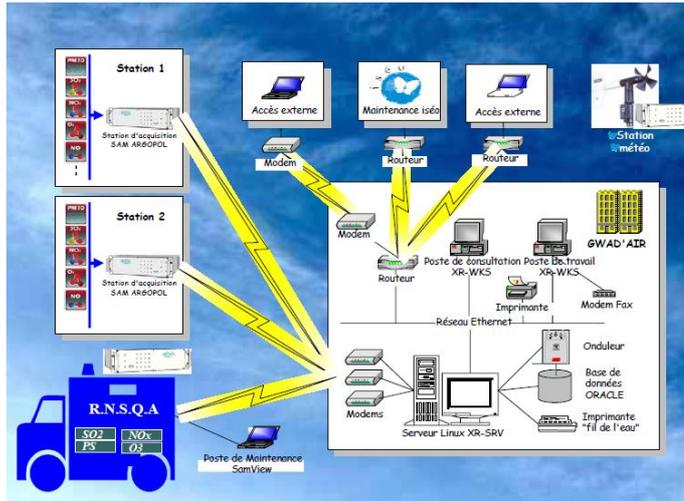


Figure 48 : Système d'acquisition des polluants par l'ANPE. (Source : ANPE, 2005).



Figure 49 : Stations de mesure de la qualité de l'air : exemple des stations de trafic routier de Beb Alioua (à gauche) et de la station urbaine de la qualité de l'air d'El Ghazela (à droite). (Photos : Ben Romdhane S., 2012).



Figure 50 : Têtes de prélèvement des polluants disposées sur une cabine (station urbaine d'El Ghazela (à gauche) et la station périurbaine de la qualité de l'air du Parc Mourouj (à droite)). (Photos : Ben Romdhane S., 2012).



Figure 51 : Analyseurs automatiques installés au sein d'une station de mesure (exemple de la station périurbaine du Parc Mourouj). (Photos : Ben Romdhane S., 2012).

V. 4. 2. Un réseau peu dense et inégalement réparti dans le Grand-Tunis

Pour la classification des stations de la qualité de l'air, le RNSQA suit les critères de la directive européenne de la qualité de l'air. Et selon le caractère de la zone, les stations sont classées différemment. Le gouvernorat de Tunis en possède trois : deux stations considérées comme de proximité du trafic routier (Beb Saadoun et Beb Alioua) et une comme périurbaine installée dans le Parc Mourouj. Quant au gouvernorat de Ben Arous, il est doté de deux stations, une urbaine (Radès) et l'autre installée dans la zone industrielle de Ben Arous. Le gouvernorat de La Manouba ne dispose que d'une seule station, urbaine. Le gouvernorat d'Ariana possède deux stations de mesure, une urbaine installée au quartier de Ghazela et l'autre station considérée comme périurbaine installée au Parc Ennahli (Fig. 52).

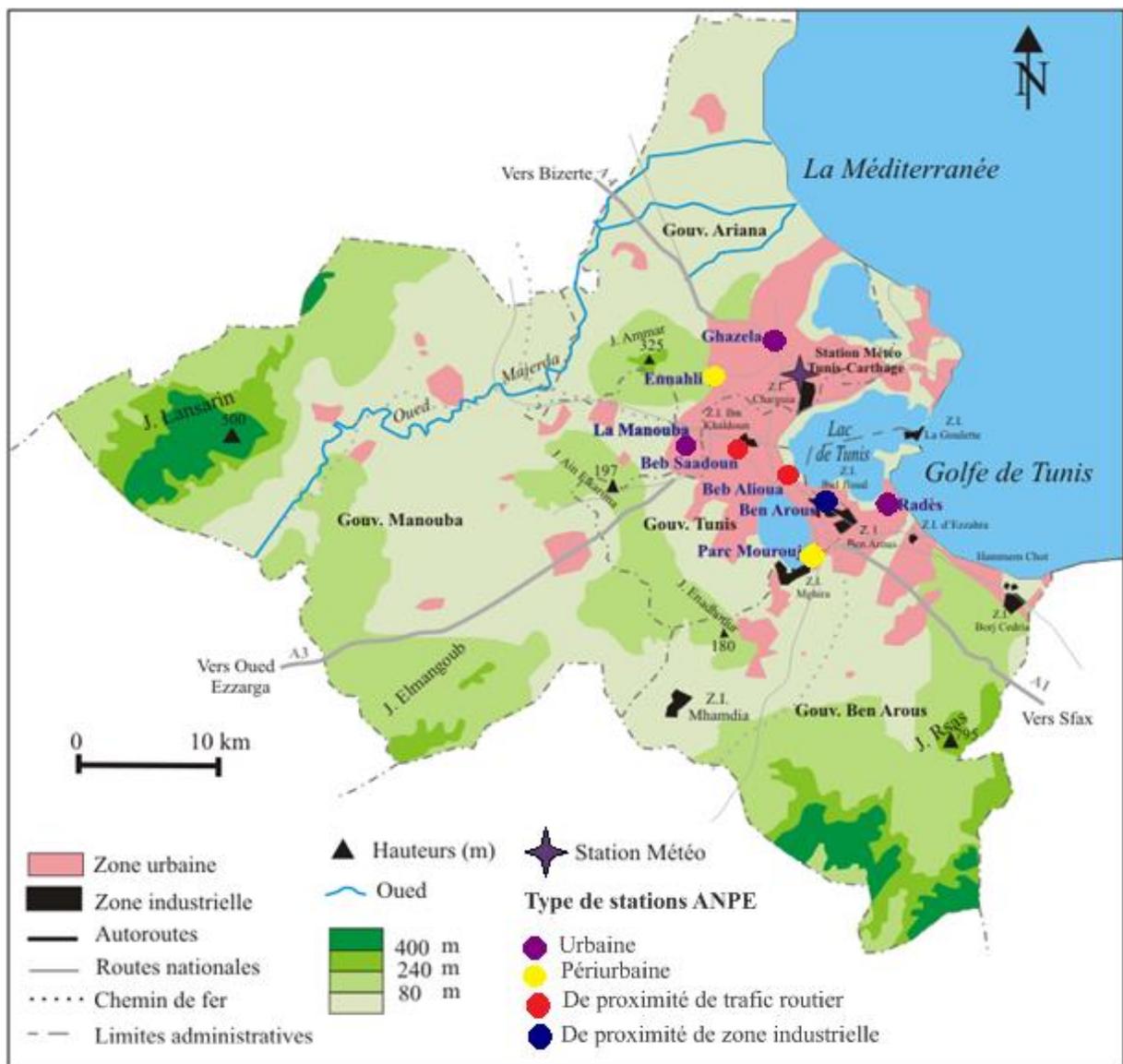


Figure 52 : Localisation des stations (ANPE) de la qualité de l'air et de la station météo de Tunis-Carthage. (Réalisée par Ben Romdhane S., à partir du fond topographique 1/200 000 de Tunis et la carte d'occupation du sol du Grand-Tunis en 2009 (AUGT)).

Ces stations de mesure de la qualité de l'air permettent l'évaluation de l'exposition à la pollution de l'air en mesurant en continu les niveaux de pollution et signalent les cas de dépassement des limites maximales en vue de l'élaboration des plans d'actions. Pour comprendre les caractéristiques de la pollution dans chaque station, il est important de connaître leurs environnements proches.

V. 4. 2. 1. Les stations de proximité de trafic routier

Une station de trafic routier est une station de mesure implantée à proximité immédiate (moins de 5 m) d'un axe routier, de manière à caractériser les niveaux de pollution issus de l'influence directe de cet axe (Airparif, 2012). Les stations de trafic représentent l'exposition maximale sur les zones soumises à une forte circulation routière. Dans le Grand-Tunis, ces stations occupent les boulevards et les principaux axes de l'agglomération, voies pénétrantes vers l'agglomération et les principales voies des zones d'activités. Les stations de trafic routier sont les suivantes :

La station de Beb Saadoun

Fondée en 2002, la station de Beb Saadoun est implantée dans un carrefour automobile sur la place de Beb Saadoun dans le gouvernorat de Tunis (Fig. 53). L'environnement de la station est occupé d'un côté par un quartier densément peuplé (cité El Akwess), de l'autre par six voies de circulation automobile séparées par un petit tunnel (Fig. 54).

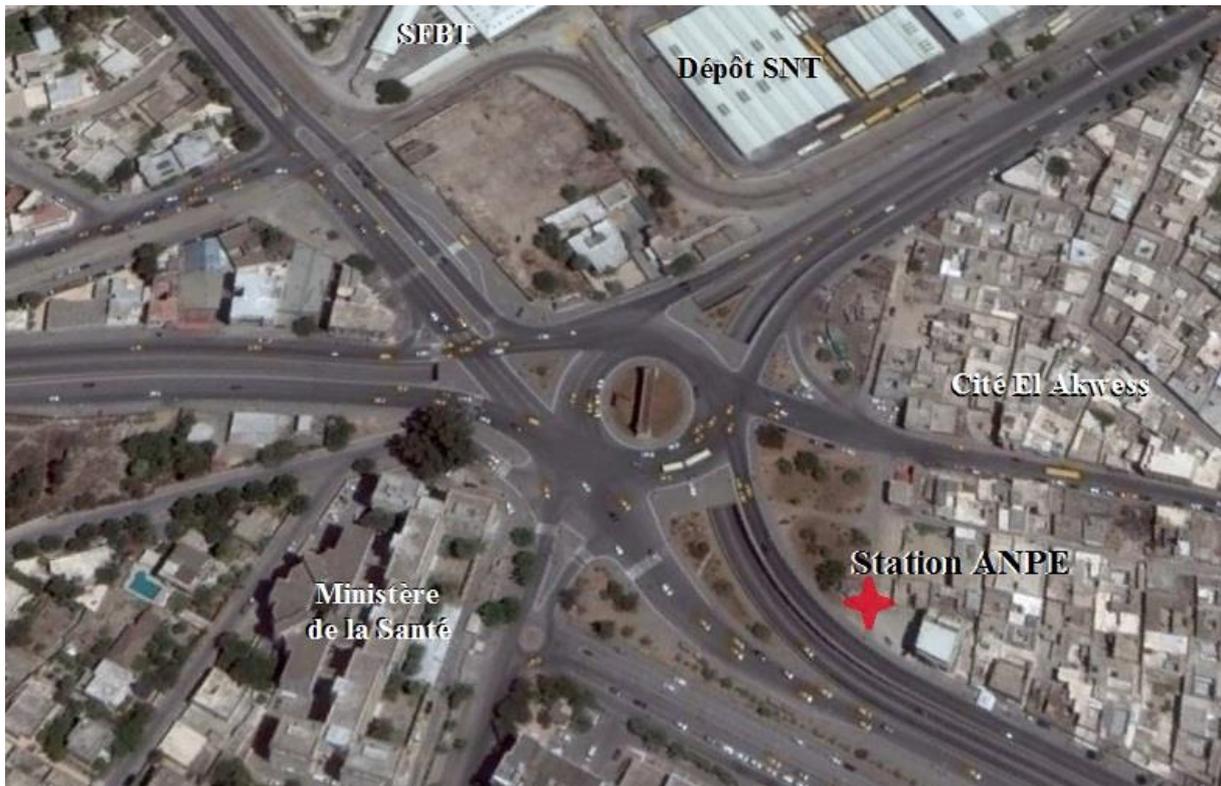


Figure 53 : Vue de la place de Beb Saadoun et site de la station de trafic de Beb Saadoun. (Image Google Earth, 2015).

La station de Beb Saadoun est dotée d'un appareil de mesure à long trajet optique (DOAS) qui permet de mesurer différents polluants sur une distance allant de 100 à 1000 m (ANPE, 2007).



Figure 54 : Environnement de la station trafic routier de Beb Saadoun. (Photos : Ben Romdhane S., 2012)

La station de Beb Alioua

La station de Beb Alioua a été installée en 2007 sur la place « Ettasamoh » dans le gouvernorat de Tunis (Fig. 55). La station est implantée dans un jardin de pelouse verte avec la présence de quelques palmiers. La place est occupée d'un côté par une station de taxi en direction des villes du sud du Grand-Tunis, de l'autre par un carrefour de trafic automobile très actif surtout le jour et les jours ouverts (Fig. 56). La station se trouve entre la sabkha d'Essijoumi au sud-est et le lac de Tunis au N-E.



Figure 55 : Vue de la place « Ettasamoh » et site de la station de trafic de Beb Alioua. (Image Google Earth, 2015).



Figure 56 : Environnement de la station de trafic de Beb Alioua. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).

V. 4. 2.2. Les stations urbaines

Les stations urbaines représentent l'air respiré par la majorité des habitants d'une agglomération. Elles sont placées hors de l'influence immédiate et directe d'une voie de circulation ou d'une installation industrielle. Les stations urbaines dans le Grand-Tunis sont les suivantes :

La station de Ghazela

La station de Ghazela a été installée en 2007 dans le gouvernorat d'Ariana. Elle est implantée dans le « technopôle de Ghazela » : dans un petit jardin à côté d'un parking de voitures du technopole (Fig. 57 et 58).



Figure 57 : Vue sur le Technopôle d'El Ghazela et site de la station urbaine d'El Ghazela. (Image Google Earth, 2015).



Figure 58 : Environnement de la station de mesure de la qualité de l'air de Ghazela. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).

La station de La Manouba

Classée comme station urbaine, la station de La Manouba est située dans la ville de Ksar Saïd dans le gouvernorat de La Manouba. Elle a été implantée en 2007 et implantée dans le jardin de l'Institut Supérieur de Sport et de l'Éducation Physique (ISSEP) à 60 m seulement de la route nationale (RN7), un axe de circulation caractérisé par un trafic routier de proximité dense le jour et très fluide la nuit et les dimanches. Cet axe représente 30 % de la totalité du trafic automobile dans le Gouvernorat de La Manouba, avec un débit journalier moyen de 42 634 V/J (DGAT, 2013) (Fig. 59 et 60).



Figure 59 : Site de la station urbaine La Manouba. (Image Google Earth, 2015).

Le site de la station de La Manouba n'obéit pas aux critères des stations urbaines à cause de sa proximité à un axe routier très actif. De ce fait, cette station est plus proche d'une station urbaine sous influence du trafic que d'une station urbaine seulement.



Figure 60 : Environnement de la station urbaine La Manouba. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).

La station de Radès

Installée en 1996, la station de Radès est la première station de mesure de la qualité de l'air dans toute la Tunisie. Elle est implantée dans la cité sportive à Radès dans le gouvernorat de Ben Arous (Fig. 61 et 62).



Figure 61 : Site de la station urbaine Radès. (Image Google Earth, 2016).



Figure 62 : Station de surveillance de la qualité de l'air de Radès. (Photos : Ben Romdhane S., 2017).

V. 4. 2. 3. Les stations périurbaines

Les stations périurbaines sont installées dans la couronne périurbaine ou la périphérie intérieure du pôle urbain. Elles doivent être situées dans une zone où les conditions favorables d'un épisode photochimique sont remplies et être représentatives du risque individuel d'exposition des populations à des valeurs supérieures aux seuils de protection de la santé (ADEME, 2002). Les deux stations périurbaines dans le Grand-Tunis sont les suivantes :

La station du Parc Mourouj

Attenante à la zone de Mourouj II (Gouvernorat de Tunis), le parc Mourouj est un espace vert en milieu urbain couvrant 200 ha. C'est au cœur de cet espace vert que la station de mesure de la qualité de l'air est installée (Fig. 63 et 64). Elle est classée comme une station périurbaine à 550 m de la nationale 3 (RN3), une grande route très fréquentée.



Figure 63 : Vue sur le « Parc Mourouj » et site de la station de la qualité de l'air Parc Mourouj (image Google Earth, 2015).



Figure 64 : Environnement de la station périurbaine Parc Mourouj. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).

La station d'Ennahli

La station Ennahli a été installée en 2004. Implantée dans le parc naturel d'Ennahli dans le Gouvernorat de l'Ariana. Le parc s'étale sur une superficie de 100 ha qui est à la fois un parcours de santé, un lieu de divertissement familial et surtout l'un des poumons du Grand-Tunis. La station est installée à l'entrée du parc à 600 m d'une route très fréquentée : la nationale 8 (RN8) (Fig. 65 et 66).



Figure 65 : Vue sur le Parc Ennahli et site de la station de la qualité de l'air Ennahli (image Google Earth, 2015).



Figure 66 : Environnement de la station périurbaine Ennahli. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).

V. 4. 2. 4. La station de proximité de zone industrielle

Les stations de proximité industrielle fournissent des informations sur les concentrations mesurées dans des zones représentatives du niveau maximum auquel la population riveraine d'une source fixe est susceptible d'être exposée par des phénomènes de panache ou d'accumulation (ADEME, 2002). Il existe une seule station de proximité industrielle dans le Grand-Tunis, c'est la station de Ben Arous.

La station de Ben Arous

La station de Ben Arous a été implantée en 1997 dans la zone industrielle du même nom à proximité de la route nationale N°1 très fréquentée avec un nombre journalier de véhicules entre 140 000 et 160 000. (Fig. 67).



Figure 67 : La station de proximité industrielle de Ben Arous. (Source : ANPE).

Ces huit stations de mesure de la qualité de l'air fournissent une information indispensable à la compréhension des phénomènes de pollution de l'air, mais ne peuvent donner des informations en tout point de l'espace de l'agglomération tunisoise. À titre comparatif, à Paris en France, 65 stations sont réparties sur un rayon de 100 km : 51 stations automatiques permanentes et 14 stations temporaires à proximité du trafic (Duché, 2013). Dans le Grand-Tunis, il existe encore plusieurs zones très polluées qui ne sont pas encore contrôlées comme la zone industrielle de La Goulette-Radès qui constitue le deuxième pôle industriel après celui de Ben Arous.

Pour une meilleure représentativité possible de mesure des polluants, les stations doivent être loin des obstacles (arbres, clôtures, édifice...). Dans le cas des arbres, l'éloignement doit être de 10 m au moins pour éviter tout phénomène d'interférence (émission de pollen dans le cas des particules en suspension, réaction chimique dans le cas de l'O₃) (ADEME, 2002). D'après notre connaissance des lieux, ces réglementations ne sont pas toujours respectées dans la majorité des stations tunisoises : notamment

celles de La Manouba, El Ghazela, Ennahli, Beb Saadoun et Ben Arous, avec la présence d'arbres et de palmiers très proches des stations de mesure.

CONCLUSION

Le Grand-Tunis présente une vulnérabilité face à la pollution atmosphérique compte tenu des fortes concentrations des populations et des nombreuses infrastructures caractérisant son territoire.

Le réseau de mesure de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis est peu dense avec une inégalité de répartition spatiale, ce qui ne donne pas une idée totale et objective sur la qualité de l'air dans cette agglomération. Jusqu'en 2016, les stations fixes sont encore au nombre de huit et la dernière acquisition de station date de 2007 avec l'installation des stations de Beb Alioua, La Manouba et Ghazela. Les données issues de ces stations permettent d'étudier les variations temporelles et spatiales de la pollution de l'air, de suivre leurs évolutions ainsi que d'analyser leurs effets sur la santé.

Chapitre VI : Variabilité spatiale et temporelle des polluants d’ozone et des particules en suspension dans le Grand-Tunis

Dans la deuxième partie, l’un de nos principaux objectifs est de caractériser la variabilité spatiale et temporelle des concentrations de l’O₃ et des PM₁₀ à différentes échelles. Pour cela, dans ce sixième chapitre, nous étudions, les facteurs de variabilité de la pollution de l’air. La variabilité temporelle et spatiale de la concentration des polluants O₃ et PM₁₀ a été évaluée à partir des mesures des stations de l’ANPE et de la station météorologique de Tunis-Carthage. Nous étudions le cycle horaire, quotidien et hebdomadaire, en fonction de la disponibilité des données. Et enfin, nous analysons l’influence des conditions météorologiques sur les concentrations d’O₃ et des PM₁₀.

VI. 1. LES FACTEURS DE VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE

La concentration de la pollution atmosphérique dépend des sources d’émission, de la situation géographique et la topographie de la ville. Elle dépend aussi, du type de temps et du climat dans laquelle la ville est située.

VI. 1. 1. Les phases de la pollution atmosphérique

La pollution se compose de trois phases temporelles et spatiales, qui se présentent au moyen du schéma émissions-immissions (Fig. 68) :

- L’émission

Selon la source d’émission, les polluants sont de deux catégories :

- Ceux qui sont émis directement par une source : c’est le cas du SO₂, le NO₂ et les PM. Ce sont des polluants dits primaires ;
- Ceux qui ne sont pas émis directement par une source, mais sont le résultat d’une transformation chimique des polluants primaires émis dans l’air. Il s’agit des polluants secondaires (Airparif, 2014).

- Le transport des polluants

Les concentrations dans l’air ambiant des polluants primaires sont maximales à proximité des sources puis tendent à diminuer au fur et à mesure que l’on s’en éloigne sous l’influence du vent, de la pluie et des différences de température, qui participent à leur transport et à leur dispersion (Johansson, 2007 ; Airparif, 2011).

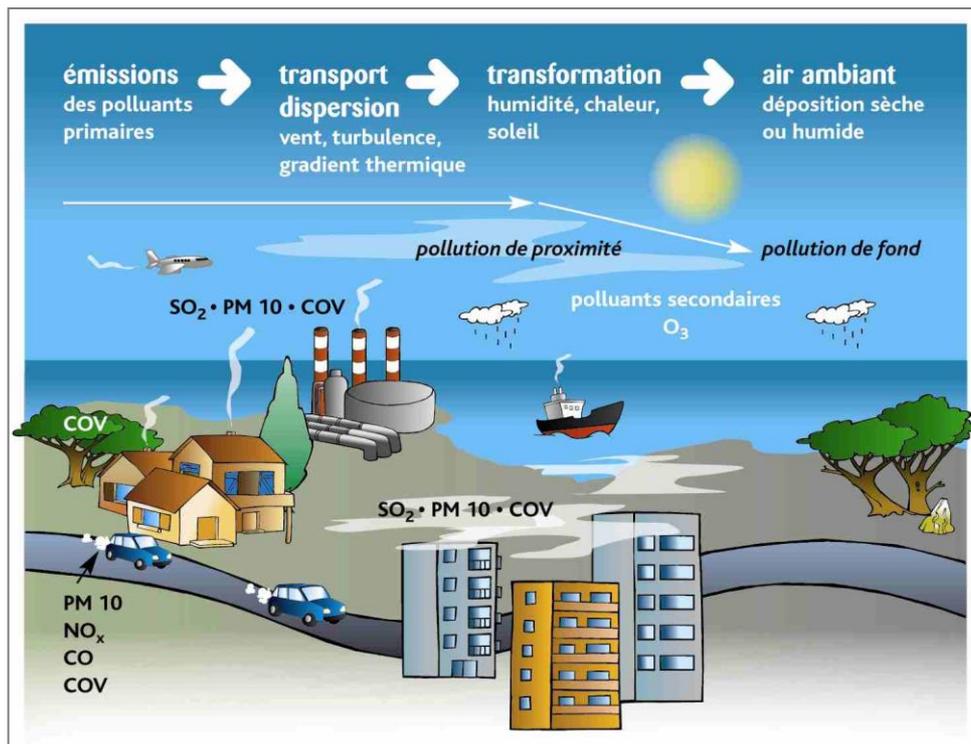


Figure 68 : Représentation schématique des sources des émissions des polluants primaires et secondaires. (Source : Air PACA, 2012).

- La dispersion

« Elle s'effectue principalement dans la couche limite atmosphérique, couche la plus troublée, agitée sans cesse par des mouvements turbulents tant horizontaux que verticaux. Dans les basses couches de l'atmosphère, la concentration des polluants dépend avant tout de la turbulence atmosphérique mais aussi du vent et de la température » (Caïni, 2011) :

- Le vent : il favorise la dispersion des polluants. Mais parfois en le déplaçant, il déplace le problème !

-La température : en été, les températures fortes peuvent favoriser la formation de l'O₃ ;

- les précipitations : sont généralement associées à une atmosphère instable, qui permet une bonne dispersion de la pollution atmosphérique. Par ailleurs, elles entraînent au sol les polluants les plus lourds. Elles peuvent parfois accélérer la dissolution de certains polluants. Globalement, les concentrations en polluants dans l'atmosphère diminuent nettement par temps de pluie notamment pour les poussières et les éléments solubles tels que le SO₂.

Dans des conditions météorologiques particulières, il peut se produire une inversion thermique. En situation normale, la température de l'air diminue avec l'altitude (environ 1°C tous les 100 m). Quand l'air chaud s'élève dans les couches supérieures plus froides, il entraîne avec lui les polluants qui sont ainsi dispersés verticalement (Fig. 69).

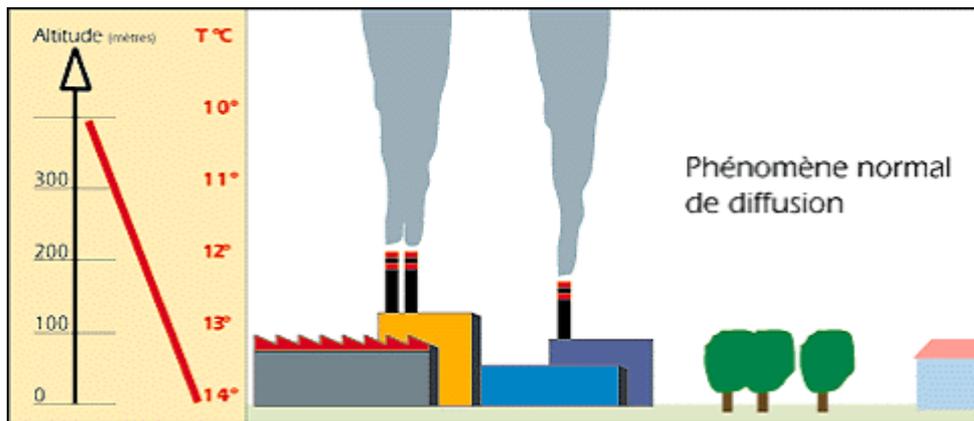


Figure 69 : Phénomène normal de diffusion des polluants. (Source : www.appa-ds.com).

Cependant, il peut arriver que le sol se refroidisse d'une façon importante la nuit et la température de l'atmosphère est alors plus élevée que celle à proximité du sol : c'est l'inversion thermique (Fig. 70). Le point où débute le réchauffement, appelé niveau d'inversion, caractérise la base de la couche d'inversion. Son sommet se situe à l'altitude où la température recommence à baisser. La discontinuité du gradient de température va empêcher les masses d'air de s'élever. Il résulte alors une masse d'air froid piégée sous une masse d'air plus chaud (El Melki, 2007 ; www.appa-ds.com).

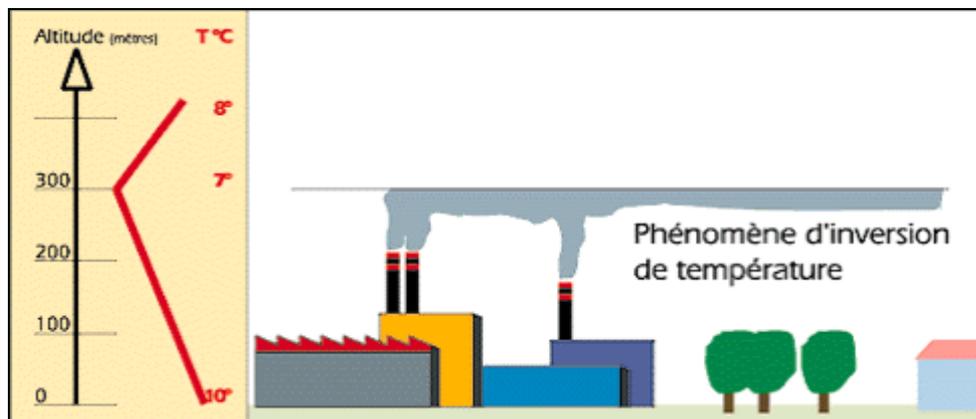


Figure 70 : Dispersion de la pollution atmosphérique lors d'un phénomène d'inversion de température. (Source : www.appa-ds.com).

VI. 1. 2. L'influence du milieu et du climat urbain

« L'espace urbain est un milieu complexe constitué à proportions variables d'espaces construits de voies de communication, de sols nus, d'espaces résidentiels, industriels, herbacés et boisés, etc. La pollution atmosphérique n'est évidemment pas la même dans chacun de ces espaces » (Maignant, 2007). En effet, le milieu urbain est un espace hétérogène dont la morphologie agit sur la variabilité spatiale de la pollution de l'air. Mais aussi sur le climat notamment sur la température, c'est l'îlot de chaleur urbain.

L’îlot de chaleur urbain est un effet de dôme thermique, créant une sorte de microclimat urbain où les températures sont significativement plus élevées. Plus on s’approche du centre de la ville, plus il est dense et haut, et plus le thermomètre grimpe. Les températures peuvent augmenter de 2°C à 12°C selon la densité du bâti. Un excès de chaleur contribue à accentuer les impacts sanitaires et environnementaux visibles en ville, notamment en période de canicule (Guay *et al.*, 2005 ; ONERC, 2010 ; Greuillet *et al.*, 2013).

L’îlot de chaleur urbain résulte de l’hyper-concentration des hommes et de leurs activités mécanisées, de la circulation automobile et de l’activité industrielle. À cela s’ajoutent les grandes surfaces asphaltées dans les villes qui absorbent beaucoup plus d’énergie solaire que les zones rurales (Cantat, 2005 ; Greuillet *et al.*, 2013). En effet, les surfaces réfléchissant ou absorbant la lumière et la chaleur et perturbant les écoulements d’air, y sont nombreuses.

Plusieurs études se sont intéressées à la relation de l’îlot de chaleur urbain et la qualité de l’air. Certaines d’entre elles ont mis en évidence une dégradation de la qualité de l’air dans les zones de formation de l’îlot de chaleur urbain (Yoshikado et Tsuchida, 1996 ; Batton-Hubert *et al.*, 1997). Le surcroît thermique urbain s’accroît par type de temps calme : quand le vent et l’humidité relative sont faibles et la durée d’insolation de la ville est assez longue. Mais il s’amenuise ou disparaît par type de temps perturbé. La différence des températures engendrée par un îlot de chaleur urbain, avec un air plus chaud en ville qu’en zone rurale environnante, favorise aussi les déplacements horizontaux des masses d’air froides (ou brises de campagne) vers les masses d’air plus chaudes au centre des villes. Cela crée une couche d’inversion des températures avec des effets sur la qualité de l’air telles que l’accumulation et la stagnation de la pollution en ville (Fig. 71). Et les niveaux de concentration des polluants augmentent avec l’intensité de l’îlot de chaleur urbain. (Escourrou, 1999 ; Charfi, 2004 ; Greuillet *et al.*, 2013).

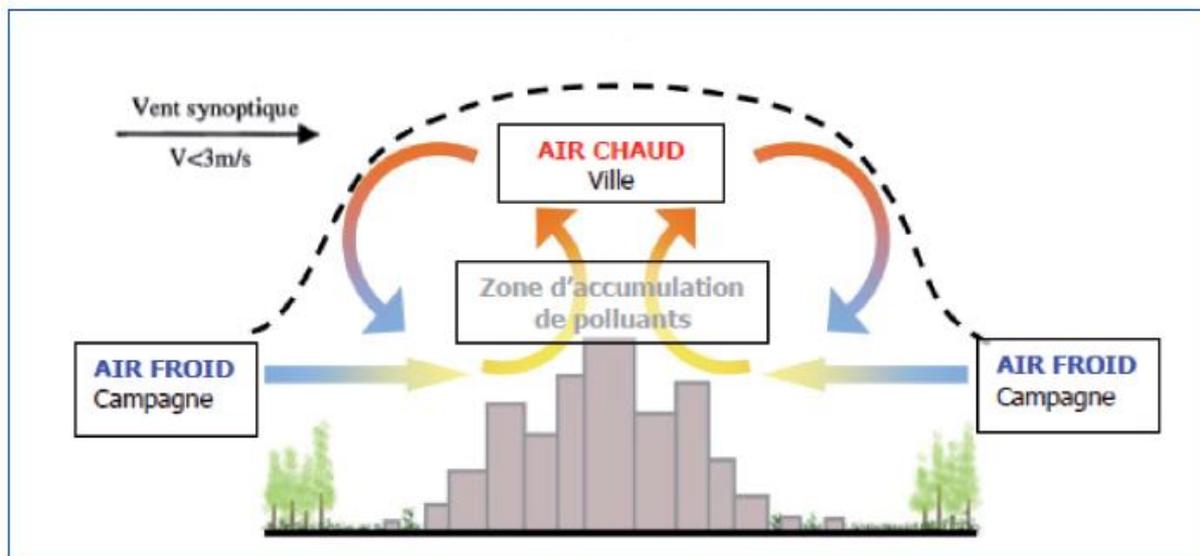


Figure 71 : Phénomène de convergence des vents entre la ville et la campagne. (Source : IAU-IDF, 2010)

Le Grand-Tunis se caractérise par un îlot de chaleur urbain nocturne dont l'importance est modeste par rapport à la grandeur de la masse urbaine. L'agglomération est plus chaude la nuit que sa campagne environnante hiver comme été. Ce faible îlot paraît être dû aux particularités climatiques de la ville et à la spécificité de son cadre naturel (plans d'eau, variété des formes topographiques). À Tunis, un noyau chaud central est focalisé sur la ville ancienne qui s'étend jusqu'aux quartiers de l'Ariana au nord et de La Manouba à l'ouest. Cela est dû à leurs tissus urbains. En revanche, les températures sont relativement homogènes à l'est du Grand-Tunis et tout au tour des sebkhs à cause de l'effet modérateur de la mer (Charfi, 2004).

IV. 1. 3. Les brises littorales et leurs impacts sur la pollution atmosphérique

La brise littorale est un phénomène météorologique d'échelle locale, générée par la discontinuité de différents paramètres météorologiques entre la terre et la mer et qui se manifeste par un changement de direction et de vitesse du vent (Fig. 72). (Lyons et Olsson, 1973 ; Simpson *et al.*, 1977 ; Dahech, 2007 ; Beltrando *et al.*, 2008).

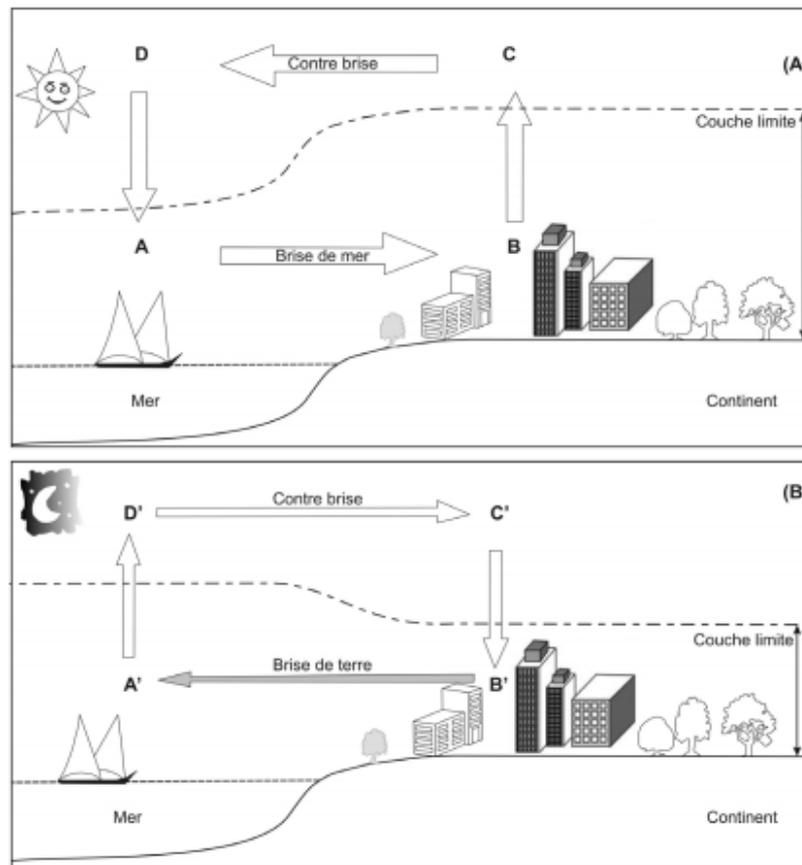


Figure 72 : Schéma simplifié de la brise de mer (A) et de la brise de terre (B). (Source : Beltrando *et al.*, 2008).

En Tunisie, la brise littorale est fréquente pendant la saison chaude (Dahech *et al.*, 2012) . Dans le Grand-Tunis, elle souffle du N-E (Charfi, 2012).

VI. 1. 4. Influence des conditions météorologiques et synoptiques

Les situations anticycloniques favorisent la survenue et la persistance d'épisodes de pollution. Par contre, les situations dépressionnaires, accompagnées par des masses d'air instables, favorisent la dispersion des polluants (Dab et Roussel, 2001 ; Dahech, 2007). En effet, les conditions météorologiques anticycloniques sont caractérisées par des vents faibles (causant une faible dispersion des polluants), des inversions de températures à basse altitude peuvent persister plusieurs jours et générer ainsi un blocage des polluants dans les basses couches de l'atmosphère. Ce genre de situations météorologiques est propice à la pollution photochimique et par les particules PM10 (Escourou, 1991 ; Camalier, 2007). Les dépressions sont des zones de basses pressions qui engendrent la convergence des vents et l'ascendance des masses d'air chaudes, créant une situation instable, synonyme de mauvais temps. Ainsi les dépressions permettent une dispersion verticale et horizontale des polluants dans l'atmosphère.

VI. 2. TENDANCE GENERALE DES CONCENTRATIONS DES POLLUANTS : O₃ ET PM10

Notre approche pour caractériser l'allure générale des polluants d'O₃ et de PM10 est basée sur une analyse descriptive des concentrations journalières et horaires des polluants. Il a été impossible de retenir les échelles hebdomadaire et mensuelle à cause des données lacunaires. Nous optons aussi pour une analyse bivariée des concentrations des deux polluants en fonction des paramètres météorologiques afin d'étudier l'influence des conditions météorologiques sur la variabilité temporelle des concentrations journalières en O₃ et en PM10.

VI. 2. 1. Régime des concentrations moyennes d'O₃

En 2008, les stations qui représentent le plus faible taux de lacunes sont : Ghazela, Radès, Parc Ennahli, Beb Alioua, La Manouba et Ben Arous. La concentration moyenne d'O₃ dans ces stations a alors été de 61 µg/m³.

Pendant cette année, les niveaux d'O₃ ont été plus élevés dans les stations urbaines (Ghazela, Radès et La Manouba) avec une moyenne de 86 µg/m³ par comparaison aux autres types de stations : la station périurbaine Parc Ennahli (48µg/m³), la station de proximité de trafic automobile, Beb Alioua (40 µg/m³) et la station de proximité de zone industrielle de Ben Arous (20 µg/m³). Ceci explique que l'O₃ ne se concentre pas dans les zones polluées en concordance avec la littérature (Martin, 2008 ; El Melki, 2010).

Dans ce qui suit, nous allons décrire la variabilité spatiale et temporelle de l'O₃ et mettre en exergue les facteurs qui expliquent cette variabilité.

VI. 2. 1. 1. Des différences des taux d'O₃ entre jours ouvrables et jours de repos (week-end)

L'analyse des moyennes journalières d'O₃ dans les stations du Grand-Tunis en 2008 montre que pour toutes les stations, le début de la semaine présente des moyennes de l'O₃ relativement faibles par rapport à la fin de la semaine (samedi et dimanche) à l'exception de la station d'Ennahli. À cette dernière, c'est le jeudi qui présente la plus forte concentration de l'O₃ (Fig. 73).

Cette légère élévation en fin de semaine s'explique par la baisse du trafic routier limitant les quantités d'oxyde d'azote dégagées par les véhicules, ce qui défavorise la photolyse de l'O₃.

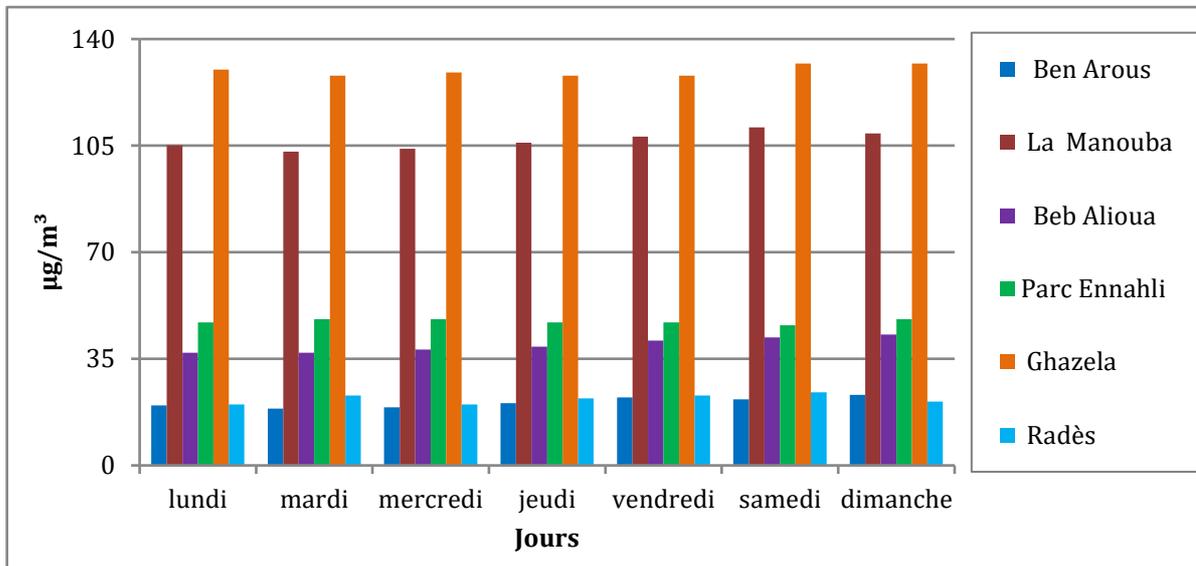


Figure 73 : Moyennes journalières de l'O₃ (en µg/m³) dans les stations du Grand-Tunis en 2008. (Source des données : ANPE).

De ce fait, la variabilité dans la semaine de l'O₃ suit la variabilité de l'émission des polluants primaires nécessaires à la formation de ce polluant : c'est l'effet « jours ouvrables/week-end ». Les activités anthropiques (trafic routier, industries...) sont plus denses durant les jours ouvrables qu'en week-end, émettant une forte quantité de NO₂ et COV : précurseurs de l'O₃ en présence de rayonnement solaire.

VI. 2. 1. 2. O₃ : Un cycle quotidien influencé par le trafic automobile

L'analyse des concentrations horaires moyennes d'O₃ dans les stations du Grand-Tunis en 2008 montre que les premières heures du matin enregistrent des concentrations assez élevées du polluant photochimique. Vers 7h et 8h, apparaît une baisse brusque dans toutes les stations (sauf pour Parc Ennahli). Ultérieurement, au cours de l'après-midi entre 13h et 17h, la croissance se stabilise relativement puis enregistre un pic vers 16h (151 µg/m³ à Ghazela). Durant cette période, les intensités des deux processus de production et de destruction sont comparables (Martin, 2008). La nuit, nous observons un niveau de fond qui diminue à partir de 17h pour toutes les stations. La faible concentration de l'O₃ coïncide avec les heures de pointe du trafic automobile et de l'accroissement des polluants primaires d'origine automobile, les échappements d'automobiles et plus particulièrement les véhicules diesel représentent une partie importante de la pollution atmosphérique par les NO_x. Une heure après, le rayonnement solaire agit sur ces polluants primaires et forme l'O₃.

La courbe de la station périurbaine du Parc Ennahli (Fig. 74) ne présente pas la même allure que les autres stations. De 6h jusqu'à 12h, elle enregistre une concentration photochimique assez forte puis une diminution pour atteindre son minimum vers 21h. Cette station bénéficie de l'avantage de sa localisation sur une colline assez élevée. Et

profite de l’état de densité de l’O₃, plus élevé que celle de l’air qui a tendance à s’accumuler dans les bas-fonds (El Melki, 2009).

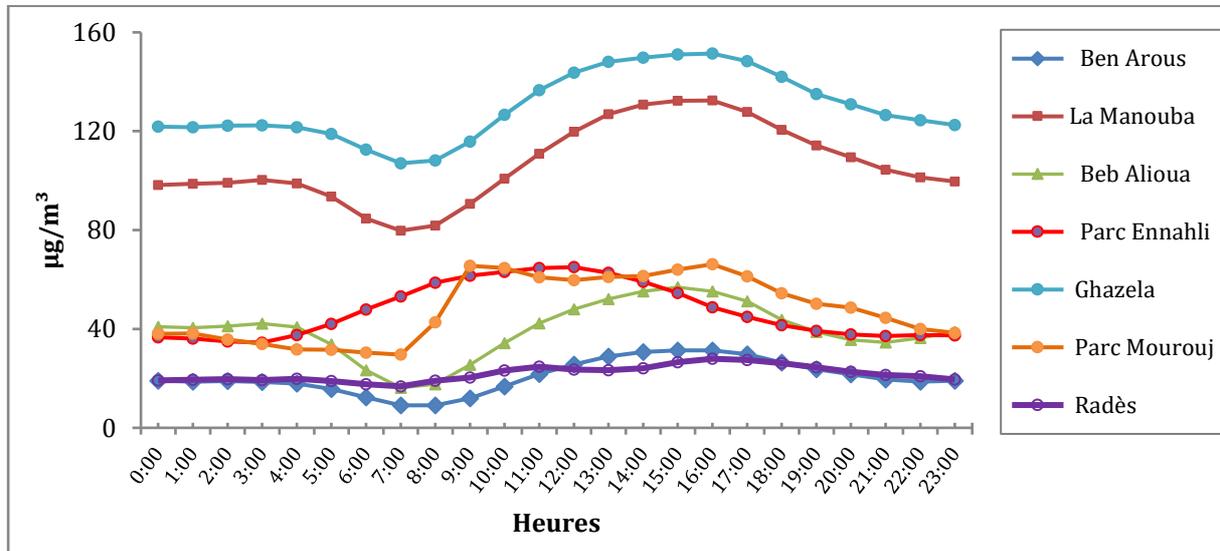


Figure 74 : Concentrations horaires moyennes en O₃ (en µg/m³) dans les stations du Grand-Tunis en 2008. (Source des données : ANPE).

VI. 2. 2. Régime des concentrations en PM10

Comme pour l’O₃, une seule année nous permet de comparer les concentrations des taux des PM₁₀ par type de station, c’est l’année 2008. Les stations qui représentent les taux les plus faibles de lacunes sont : Beb Saadoun, Ben Arous, La Manouba, Ghazela et Beb Alioua.

En 2008, la moyenne des PM₁₀ enregistrée dans ces stations a été de 79 µg/m³. Les niveaux les plus élevés ont été enregistrés par les stations de proximité routière (Beb Saadoun et Beb Alioua) avec une moyenne de 86 µg/m³, suivies par la station de proximité de zone industrielle de Ben Arous (76 µg/m³) et enfin le plus faible taux a été pour les stations urbaines (73 µg/m³). En effet, les niveaux de PM₁₀ sont plus élevés à proximité des sources d’émission des polluants notamment le trafic automobile.

VI. 2. 2. 1. Cycle hebdomadaire de PM10 : effet « jours ouvrables/week-end »

La figure suivante (Fig. 75) présente les taux journaliers moyens des PM₁₀ et la moyenne annuelle dans les stations du Grand-Tunis. Cette figure montre que :

- Les concentrations les plus élevées et les plus dispersées par rapport à leurs moyennes ont été observées dans la station à proximité routière de Beb Alioua ;
- Les taux journaliers de PM₁₀ sont relativement plus élevés durant la semaine et plus faibles le week-end. L’effet « jours ouvrables/week-end » influe sur les niveaux des PM₁₀. Durant la semaine, le trafic routier est plus dense et la majorité des industries fonctionnent donc libèrent plus de polluants.

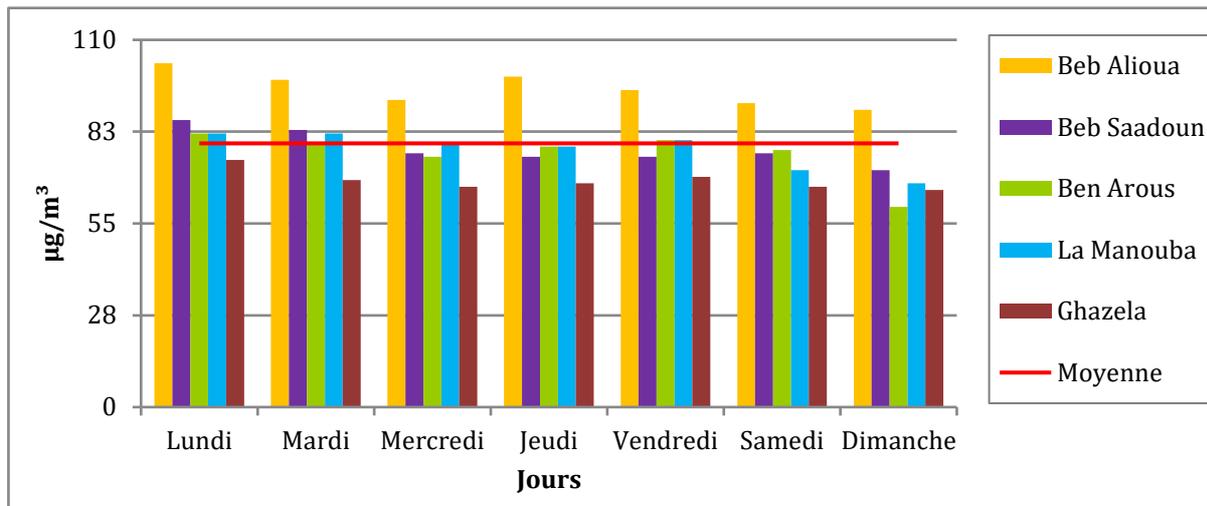


Figure 75 : Taux journaliers moyens et la moyenne annuelle des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans les stations du Grand-Tunis en 2008. (Source des données : ANPE).

VI. 2. 2. Variabilité quotidienne des taux de PM10

La figure suivante (Fig. 76) illustre les évolutions journalières des concentrations horaires des PM10 dans les stations du Grand-Tunis en jours ouvrables et *week-end* en 2008.

Pendant les jours ouvrables, dans la station urbaine de La Manouba, le cycle journalier présente une forte amplitude avec un niveau maximum le matin de $132 \mu\text{g}/\text{m}^3$ qui correspond aux périodes de pointe de la circulation routière puisque la station de La Manouba est à 60m d’une route très fréquentée ; en fin de journée, à 22h cette station enregistre une remontée moins marquée ($92 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le même profil est observé sur l’autre site urbain de Ghazela, avec une amplitude moindre, puisqu’elle est plus loin des sources des émissions des polluants. Pour les stations de trafic, la station de Beb Saadoun enregistre un pic à 9h ($123 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et un pic moins marqué à 15h ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Quant à Beb Alioua le pic matinal est un peu tardif, enregistré à 10h avec $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$ puis les niveaux de PM10 restent relativement constants et enregistrent un pic à 19h ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Enfin pour la station de proximité de la zone industrielle de Ben Arous, le pic matinal est observé à 10h. L’après-midi, le niveau des particules est relativement constant et s’affaiblit à partir de 17h avec la fermeture des établissements industriels. En effet, nous observons une grande différence entre le profil des jours ouverts et du *week-end* (samedi et dimanche) notamment au niveau des amplitudes qui sont beaucoup plus faibles pendant le *week-end*. Rien que la station de trafic de Beb Alioua, même pendant le *week-end*, elle présente des niveaux élevés mais le pic matinal arrive seulement pour 13h ($102 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

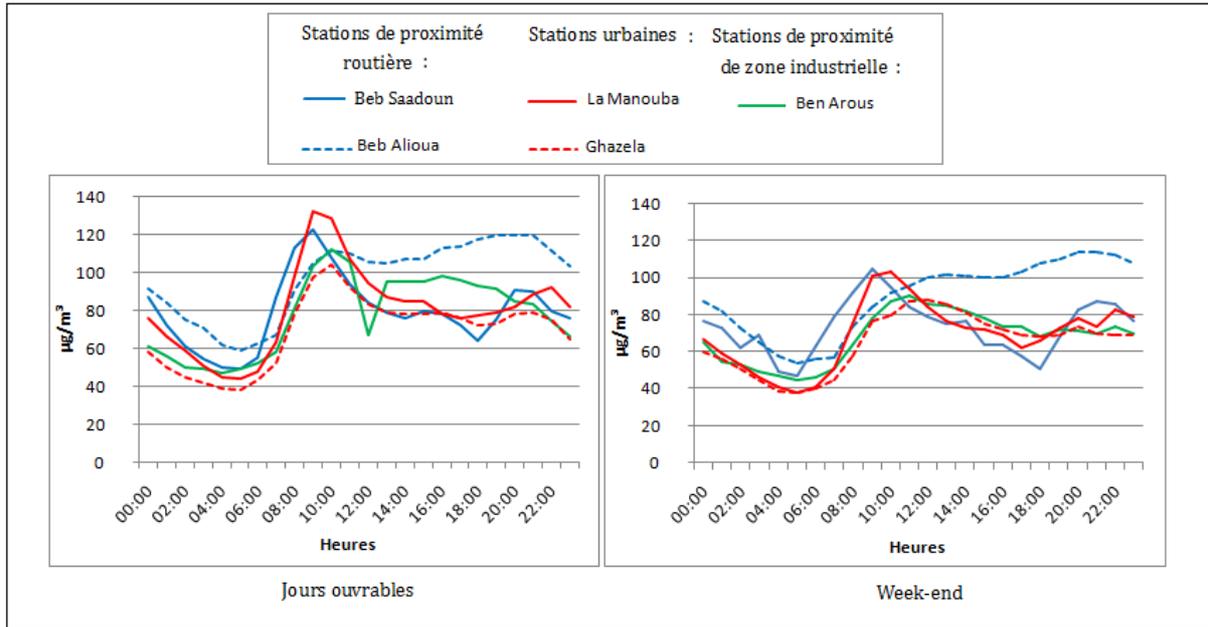


Figure 76 : Evolutions journalières des concentrations horaires de PM10 en 2008 en jours ouvrables et le week-end dans les stations du Grand-Tunis. (Source des données : ANPE).

VI. 3. INFLUENCE DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES SUR LA VARIABILITE TEMPORELLE DES EXTREMES JOURNALIERS DES POLLUANTS : O₃ ET PM10

Dans le but d’étudier l’influence des conditions météorologiques sur la variabilité temporelle et saisonnière des concentrations journalières d’O₃ et des PM10, nous avons analysé les jours avec les plus forts taux et les plus faibles taux des polluants en fonction des facteurs climatiques. Pour ce faire, nous avons sélectionné la plus longue liste de mesures de chaque polluant, O₃ et PM10, ayant le taux le plus faible de lacunes, et cela dans les stations qui ont enregistré des dépassements de la valeur-limite relative à la santé pour le polluant considéré. La méthode des centiles nous a servi pour calculer les taux extrêmes des polluants : C5 % et C95 %, pour repérer, respectivement, les 5 % des jours avec les taux les plus élevés d’O₃ et des PM10 et les 5 % des jours les plus faibles de ces polluants. Les jours extrêmes d’O₃ et des PM10 sont mis en relation avec les paramètres climatiques [température journalière (en °C) : minimale, maximale; l’humidité relative de l’air journalière (en %) minimale, maximale et la vitesse du vent journalière (en m/s) minimale et maximale].

VI. 3. 1. O₃ : Forte concentration durant la saison chaude, par temps stable

Sur la période 2005-2011, les années 2005 et 2006 présentent les taux les plus faibles de lacunes des mesures d’O₃ (≤ 5 %) enregistrés à la station périurbaine du Parc Mourouj.

D’après le tableau suivant (Tab. 20), nous pouvons conclure que :

- Les concentrations horaires extrêmes d’O₃ varient de 6 µg/m³ et 168 µg/m³. Les concentrations les plus élevées (C5 %) sont enregistrées entre les mois de juin et de

septembre, ce qui coïncide avec la saison chaude. C’est la période durant laquelle la durée du jour est plus longue et l’angle d’incidence du rayonnement solaire est plus grand, donc un rayonnement ultraviolet intense, nécessaire aux réactions photochimiques.

Tableau 20 : Les Concentrations horaires d’O₃ et les données météorologiques [température (°C), l’humidité relative de l’air (%) et la vitesse du vent (m/s)] des jours avec les taux extrêmes d’O₃ dans la station périurbaine du Parc Mourouj en 2005 et 2006. (Source de données : ANPE et INM).

	Taux journalier d’O ₃ (µg/m ³)		Température (°C)		Humidité relative (%)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
C 5 %	6	18	2	25	24	100
C 95 %	106	168	21	42	55	100

	Vitesse du vent (m/s)		Pression atmosphérique (hPa)	
	Min	Max	Min	Max
C 5 %	0,5	13	1009	1041
C 95 %	1,6	15	1006	1021

Les centiles : C5 % : 5 % des jours avec les taux les plus faibles d’O₃.

C95 % : 5 % des jours avec les taux les plus élevés d’O₃.

- Les extrêmes thermiques des taux d’O₃ les plus faibles (C95 %), sont de 2°C et 25°C. Pour les taux d’O₃ les plus élevés les maximums absolus varient entre 21°C et 42°C. Cependant, il y a des jours où la température était tout aussi élevée, mais le niveau d’O₃ a été faible. Comme ce fut le cas du 22 mai 2006, où les extrêmes de la température ont varié entre 19,8°C et 41,4°C, rien que la moyenne journalière d’O₃ n’a pas dépassé 76 µg/m³.

- La vitesse du vent est parmi les paramètres importants qui agissent sur la dispersion des polluants, pour les deux types de jours extrêmes, la moyenne n’a pas dépassé 3 m/s.

VI.3. 2. PM10 : forte concentration durant les intersaisons

L’année 2008 est la période qui présente le plus faible taux de lacunes pour les mesures des PM10 ($\leq 5\%$) et cela dans deux stations de la qualité de l’air, Beb Alioua et Ben Arous. De ce fait, nous avons retenu les C5 % et C95 % des mesures des PM10 dans les deux stations durant cette année 2008.

L’analyse des mesures des PM10 et des données météorologiques durant cette année montre que (Tab. 21) :

- Les concentrations journalières extrêmes des PM10 ont varié entre $4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $287\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elles sont enregistrées durant toute l’année, de janvier à décembre, avec une grande majorité automnale et printanière pour les taux les plus faibles et une forte concentration hivernale pour les taux les plus élevés.
- La vitesse du vent moyen journalier est plus faible pour les taux les plus élevés de PM10 avec $2,7\ \text{m/s}$ contre $5,3\ \text{m/s}$ pour les taux les plus faibles. Les vents modérés et forts dispersent les polluants ; quand le vent est faible, l’air stagne, ce qui favorise l’accumulation des PM10.

Tableau 21 : Concentrations de PM10 et données météorologiques moyennes [la température ($^{\circ}\text{C}$), l’humidité relative de l’air (%) et la vitesse du vent (m/s)] des jours extrêmes dans les deux stations de la qualité de l’air Ben Arous et Beb Alioua en 2008. (Source de données : ANPE et INM).

	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Température ($^{\circ}\text{C}$)		Vitesse du vent (m/h)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
C5%	4	35	13	25	5,3	22,7
C95%	170	287	3	42	2,7	5,3

Les centiles : C5 % : 5 % des jours avec les taux les plus faibles de PM10.

C95 % : 5 % des jours avec les taux les plus élevés de PM10.

CONCLUSION

Les concentrations des polluants atmosphériques sont extrêmement changeantes dans le temps et dans l’espace, en fonction des conditions météorologiques, et

environnementales ainsi qu'en fonction de la répartition des sources d'émission. Toutes les stations de mesure de la qualité de l'air, dans le Grand-Tunis, présentent des niveaux d'O₃ faibles dans la semaine et plus élevés le week-end, sauf la station périurbaine d'Ennahli qui enregistre des taux plus élevés le jeudi. De ce fait, la variabilité dans la semaine de l'O₃ est sous l'effet des « jours ouvrables/week-end ». En fin de semaine, la baisse du trafic routier limite les quantités d'oxyde d'azote dégagées par les véhicules, ce qui défavorise la photolyse de l'O₃.

Pour les PM10, les niveaux les plus élevés sont enregistrés à proximité des sources d'émission des polluants notamment le trafic automobile. Et ce sont les sites de proximité routière (Beb Saadoun et Beb Alioua) qui sont les plus pollués suivis par le site de proximité de zone industrielle de Ben Arous et enfin le plus faible taux a été pour les sites urbains (La Manouba et Ghazela). Comme pour l'O₃, l'effet de « jours ouvrables/week-end » influe sur les niveaux des PM10. Les taux journaliers de PM10 sont relativement plus élevés durant la semaine et plus faibles le week-end et cela en relation avec l'émission des polluants particulaires, le trafic automobile notamment les véhicules diesel mais aussi des rejets industriels.

Nous pouvons déduire qu'au cours de la semaine la population tunisoise est exposée à la pollution particulaire et à la pollution photochimique en fin de semaine. La vulnérabilité à ces polluants très délétères à la santé respiratoire varie selon la localisation par rapport aux sources d'émission de ces pollutions. Pour les PM10, plus on s'approche des sources des émissions de ce polluant plus le risque est majeur. Tandis que pour l'O₃, plus on s'éloigne des sources des polluants primaires nécessaires à sa formation plus le risque est important.

Dans le Grand-Tunis, la saison photochimique va de juin à septembre avec les concentrations les plus élevées d'O₃. Les extrêmes thermiques des taux d'O₃ les plus faibles sont de 2°C et 25°C. Pour les taux d'O₃ les plus élevés les maximums absolus varient entre 21°C et 42°C. Pour les PM10 : les taux les plus faibles sont majoritairement concentrés en automne et au printemps quant aux taux les plus élevés sont concentrés en hiver. La vitesse du vent est le principal facteur agissant sur la concentration des PM10. Elle est de 2,7 m/s pour les taux les plus élevés et 5,3 m/s pour les taux les plus faibles.

Chapitre VII : Épisodes photochimiques et types de temps dans le Grand-Tunis

Ce chapitre se focalise sur la pollution photochimique. Nous étudierons les jours de dépassement des seuils limites relatifs à la santé et les seuils d'alerte tunisiens relatifs à l'O₃. Pour ce faire, nous allons délimiter les épisodes photochimiques puis nous allons les classer selon leurs poids et leurs intensités.

Nous allons caractériser la variabilité des jours de dépassement des normes tunisiennes relatives à l'O₃ ainsi que les types de temps à risque et cela en mettant en relation les concentrations moyennes horaires des taux des polluants avec les variables météorologiques.

VII. 1. LES DEPASSEMENTS DES NORMES TUNISIENNES RELATIVES À L'O₃

Dans un premier temps, nous allons établir une comparaison entre le nombre de dépassements des seuils tunisiens et les recommandations de l'OMS relatifs à l'O₃. Puis nous allons classer ces épisodes photochimiques.

Pour calculer les poids des épisodes photochimiques, nous nous inspirons de la classification des vagues de chaleur (Météo France, 2015 ; Ben Boubaker, 2010), et cela en cumulant le surplus d'O₃ au-delà de la valeur-limite (235 µg/m³, moyenne sur une heure).

En faisant abstraction des lacunes, entre 2005 et 2011, le RNSQA enregistre des dizaines de dépassements des seuils relatifs à l'O₃.

VII. 1. 1. Pics assez fréquents d'O₃, notamment en saison chaude

Entre les années 2005 et 2011, 54 dépassements de la valeur-limite relative à l'O₃ (235 µg/m³, moyenne sur une heure) ont été enregistrés (Fig. 77 et Annexe V) :

- 20 dépassements ont été enregistrés, à la station du Parc Mourouj, durant 18 jours : 5 dépassements en 2005, 5 dépassements en 2007, 5 dépassements en 2010 et 6 dépassements en 2011 ;
- 29 dépassements à la station de La Manouba en une seule année (2008) et ceux pendant 7 jours ;
- Et enfin, 5 dépassements à Ben Arous durant 3 jours en 2006.

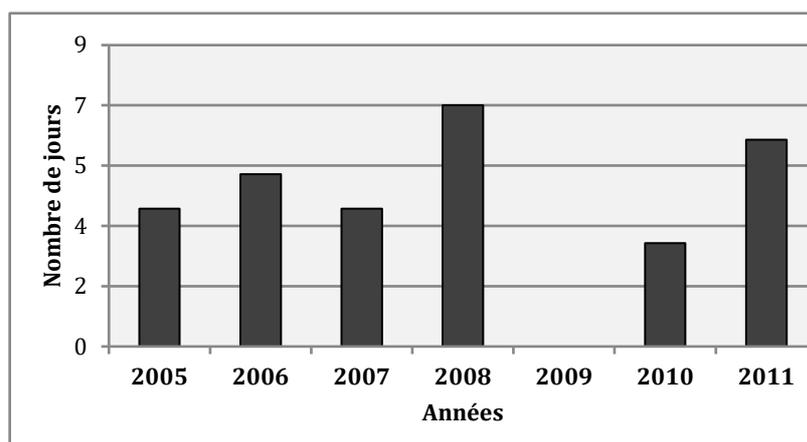


Figure 77 : Nombre de jours de dépassements de la valeur-limite relative à l'O₃ (235 µg/m³, moyenne d'une heure) de la période 2005-2011 dans les stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis. (Source des données : ANPE).

Le seuil moyen horaire de 235 µg/m³ a été dépassé plus particulièrement en été et au printemps avec respectivement 58 % et 40 % du total des dépassements, contre 2 % seulement en automne et 0 % en hiver. Cette tendance estivale de concentration des dépassements d'O₃ est liée aux conditions de formation de ce polluant secondaire qui résulte de la transformation photochimique des polluants primaires sous l'effet du rayonnement ultraviolet.

Les dépassements de la valeur-limite en rapport avec le nombre de jours et d'heures de mesure de l'O₃ dans les stations du Parc Mourouj, La Manouba et Ben Arous, qui ont enregistré les dépassements, sont représentés dans le tableau suivant (Tab. 22).

Tableau 22 : Dépassements de la valeur-limite, nombre de jours et d'heures de mesure d'O₃ dans les stations du Parc Mourouj, La Manouba et Ben Arous. (Source des données : ANPE).

Stations	Années	Nombre de jours de mesures par année	Nombre de mesures par année (en heures)	Lacunes (%)	Valeur limite (relative à la santé) 235 (µg/m ³) ≤		
					Nombre de jours de dépassements	Nombre d'heures	Valeur maximale d'O ₃
Parc Mourouj	2005	347	8327	4,9	4	5	257
	2007	236	5665	35,3	4	4	255
	2010	282	6778	18,1	3	5	275
	2011	258	6202	13,26	6	6	350
La Manouba	2008	365	6966	20,7	7	29	513
Ben Arous	2006	192	4134	47,19	3	5	246

D'après ce tableau, nous constatons que le seuil d'alerte (qui est considéré comme atteint si la moyenne d'une heure de l'ozone dépasse deux fois la valeur-limite pendant une période de 30 jours) a été largement dépassé :

- à la station La Manouba, le seuil d'alerte a été déclenché 14 fois en une seule année (2008) ;
- à Ben Arous, 2 fois en 2006 ;
- au Parc Mourouj : l'alerte a été déclenchée 2 fois en 2005, une seule fois en 2007, 2 fois en 2010 et 3 fois en 2011.

59 % des dépassements du seuil d'alerte d'O₃ relevés dans la station de La Manouba ont été enregistrés l'après-midi, entre 13h et 18h, lorsque les conditions de température et d'ensoleillement sont les plus favorables à la formation de l'O₃. Donc, en absence du rayonnement solaire direct, le processus de formation de l'O₃ est stoppé, pourtant, les dépassements des seuils dans les stations du Parc Mourouj et Ben Arous ont été enregistrés la nuit, de 19h à 21h et les premières heures du matin. De ce fait, d'autres facteurs influencent la concentration de l'ozone, autres que les polluants primaires et la radiation solaire (Fig. 78).

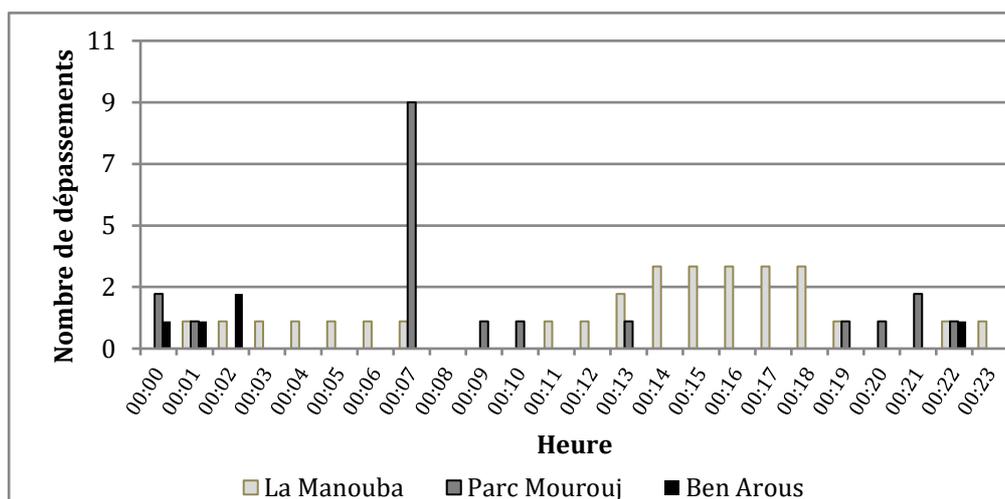


Figure 78 : Nombre de dépassements de la valeur-limite relative à l'O₃ (235 µg/m³, moyenne pendant une heure) durant la journée dans les stations du Parc Mourouj, La Manouba et Ben Arous de la période 2005-2010. (Source des données : ANPE).

À l'échelle hebdomadaire, c'est du mardi au vendredi que l'on enregistre le plus de dépassements (plus qu'un seul dépassement). Tandis qu'à la fin de la semaine, le samedi un seul dépassement est enregistré au Parc Mourouj et aucun dépassement dans les deux autres stations. 11 dépassements les dimanches à La Manouba, contre aucun dépassement à la station du Parc Mourouj et de Ben Arous (Fig. 79).

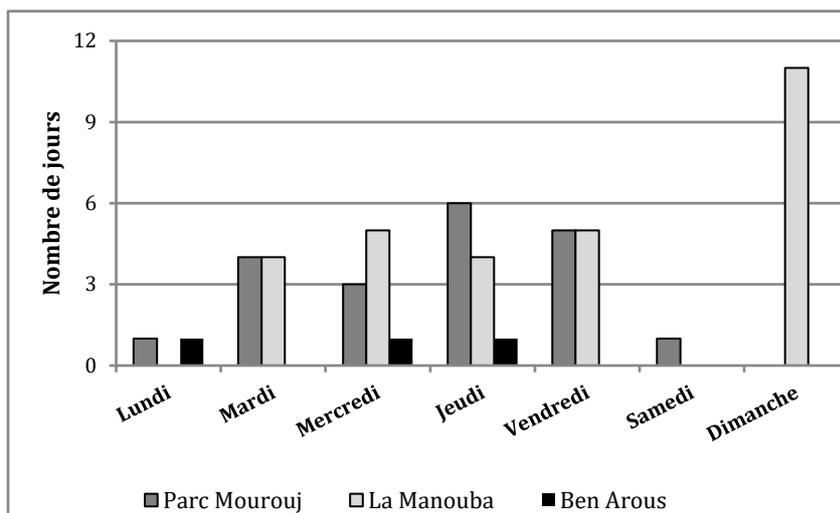


Figure 79 : Nombre de dépassements de la valeur-limite d'O₃ (235 µg/m³, moyenne pendant une heure) durant la semaine dans les stations du Parc Mourouj et de La Manouba de la période 2005-2010. (Source des données : ANPE).

Cette évolution durant les jours ouvrables du nombre de dépassements du seuil d'alerte de l'O₃, suit le rythme hebdomadaire du trafic automobile et la production des polluants primaires, notamment les NO_x, nécessaire à la formation d'O₃. En ce qui concerne les dépassements à La Manouba relevés les dimanches, d'autres facteurs qui interviennent, notamment la topographie du site.

Par comparaison à l'indice ATMO français de l'O₃, qui note la qualité de l'air de 1 (meilleur) à 10 (mauvais), le seuil tunisien de la valeur guide, relatif au bien-être (150-200µg/m³) est classé comme « très médiocre » à « mauvais ». Et le seuil de la valeur limite relative à la santé (235 µg/m³) est classé mauvais. Tandis que le seuil de l'OMS relatif à l'O₃ (150-200µg/m³) est classé comme « très médiocre » à « mauvais » et le seuil français (180 µg/m³) « très médiocre » (Tab. 23).

Tableau 23 : Niveau de l'indice ATMO d'O₃ en France (en µg/m³). (Quénel *et al.*, 2003).

Classe	Seuils d'O ₃ (µg/m ³)
1 - Excellent	0-30
2- Très bon	31-50
3- Bon	51-70
4- Assez bon	71-90
5- Moyen	91-110
6- Médiocre	111-145
7-Très médiocre	146-180
8- Mauvais	181-250
9- Très mauvais	251-360
10- Exécrable	361-

VII. 1. 2. Classement des épisodes photochimiques

Entre 2005 et 2011, nous recensons 18 épisodes photochimiques dont le poids variant entre $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $736 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Du point de vue persistance, l'épisode photochimique enregistré en 2011a été le plus long avec 4 jours successifs (du 21 au 24 juin 2011), 4 pics d' O_3 et un poids de $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tandis que le plus fort épisode photochimique a été de $736 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enregistré en un seul jour (le 29 août 2008) et 5 pics d' O_3 .

Le plus grand nombre de dépassements de la valeur limite a été au nombre de 12, enregistré en 3 jours (du 29 avril au 1^{er} mai 2008) et avec un poids de $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les plus faibles épisodes sont de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de poids seulement, enregistrés en une seule journée et avec un seul pic d' O_3 , et cela pendant le 2 août 2005 et le 13 juin 2007 (Tab. 24 et Fig. 80).

Tableau 24 : Poids des épisodes photochimiques dans le Grand-Tunis de la période 2005-2011 [Le cumul horaire des surplus d' O_3 au-delà de la valeur limite ($235 \mu\text{g}/\text{m}^3$)].
(Source des données ANPE).

Rang	Période photochimique	Poids d' O_3	Nombre de jours	Nombre d'heures de dépassements
1	29 août 2008	736	1	5
2	Du 21 au 24 juin 2011	170	4	4
3	31 août 2008	148	1	3
4	29 avril au 1 mai 2008	122	3	12
5	Du 17 au 18 juin 2010	64	2	3
6	27 avril 2008	62	1	8
7	Du 29 au 30 juillet 2005	52	2	3
8	27 août 2008	36	1	1
9	17 juin 2006	31	1	1
10	1 juillet 2010	30	1	2
11	Du 23 au 24 juillet 2007	24	2	2
12	30 juin 2005	22	1	1
13	21 novembre 2007	16	1	1
14	28 juin 2006	9	1	1
15	Du 28 au 29 juin 2006	12	2	2
16	26 juin 2006	13	1	3
17	2 août 2005	4	1	1
18	13 juin 2007	4	1	1

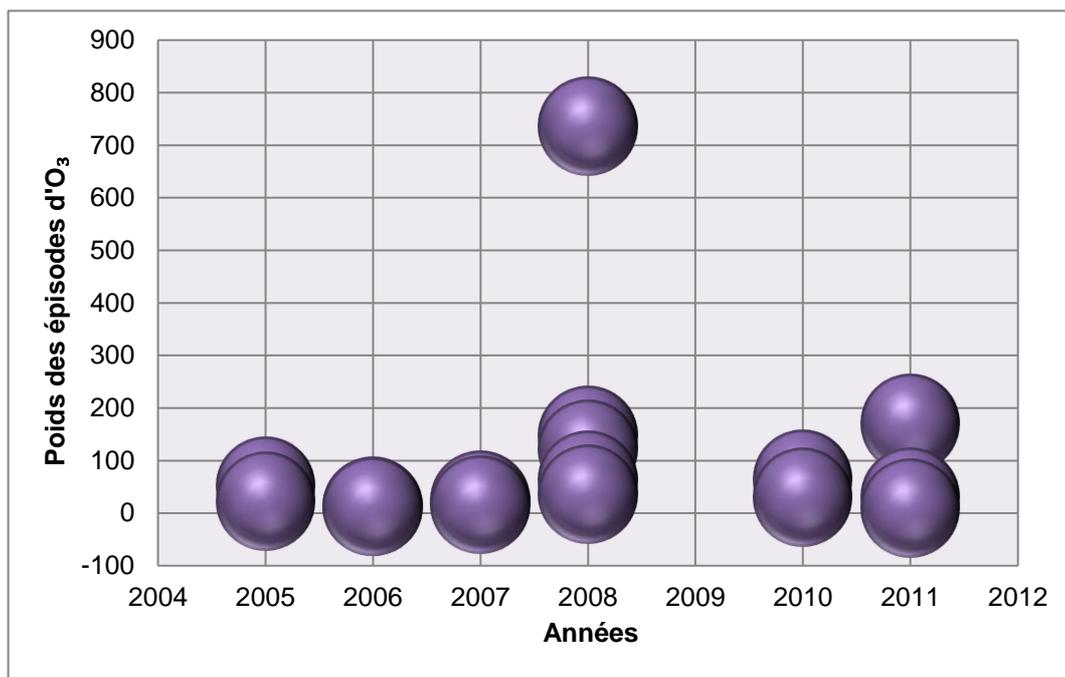


Figure 80 : Poids des épisodes photochimiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de la période 2005-2011. (Source des données : ANPE). [Le cumul horaire des surplus d' O_3 au-delà de la valeur limite ($235 \mu\text{g}/\text{m}^3$)].

VII. 1. 3. Des épisodes photochimiques aux caractéristiques thermiques bien marquées

83 % des jours (20 jours) de dépassements de la valeur limite relative à l' O_3 ont été enregistrés pendant la saison chaude qui s'étend du mois de mai au mois d'octobre (chapitre IV). 17 % seulement des jours (4 jours) de dépassement ont été observés hors la saison chaude, notamment en novembre et avril.

Les températures minimales absolues des jours de dépassement de la valeur limite relative à l' O_3 ont varié entre $9,3^\circ\text{C}$ à $27,4^\circ\text{C}$ et les températures maximales absolues entre 21°C et $45,2^\circ\text{C}$. Les plus fortes chaleurs sont durant la saison chaude et notamment pendant l'été (juin-août) :

- températures minimales, entre 17°C et $27,4^\circ\text{C}$;
- températures maximales, entre 29°C et $45,2^\circ\text{C}$.

60 % des jours de dépassement durant la saison chaude (mai-octobre) coïncident avec un jour paroxysmique : 7 jours à « forte chaleur », 4 jours à « très forte chaleur » et un jour « torride » (Tab. 25).

Tableau 25 : Les jours de dépassements de la valeur limite relative à l'O₃ durant la saison chaude (mai-octobre) (ANPE), les températures minimales et maximales absolues à la station de Tunis-Carthage (INM) et le type de paroxysme thermique de la journée, de la période 2005-2011.

Date	Valeur horaire maximale de l'O ₃ de la journée (µg/m ³)	Température minimale absolue de la journée	Température maximale absolue de la journée	Type de paroxysme thermique
30/06/2005	257	22,6	36,3	Forte chaleur
29/07/2005	255	25,9	39,7	Très forte chaleur
30/07/2005	249	26,4	36,7	Très forte chaleur
02/08/2005	239	26,9	35,5	Très forte chaleur
13/06/2007	239	20,3	32,8	Forte chaleur
26/06/2006	240	23,1	38,8	Forte chaleur
28/06/2006	236	24,2	38,8	Forte chaleur
29/06/2006	246	23	32,4	-
23/07/2007	239	23,1	43,4	Très forte chaleur
24/07/2007	255	27,4	45,2	Torride
01/05/2008	251	17	24	-
27/08/2008	271	21	32	-
29/08/2008	513	20	33	Forte chaleur
31/08/2008	317	22	34	Forte chaleur
17/06/2010	237	20	36	Forte chaleur
18/06/2010	275	20	30	-
01/07/2010	263	22	32	-
17/06/2011	266	18	32	-
21/06/2011	268	17	29	-
22/06/2011	248	18	35	-
23/06/2011	350	20	37	Forte chaleur
24/06/2011	244	22	34	Forte chaleur
28/06/2011	244	19	36	-

Les épisodes photochimiques sont plus fréquents en été, encore plus pendant les journées paroxysmiques. Ceci montre bien l'effet du facteur thermique sur l'évolution de l'O₃ : un ensoleillement maximal et une température élevée. Des conditions favorables en présence des polluants primaires pour la formation de l'O₃.

VII. 2. LES ÉPISODES PHOTOCHEMISTIQUES

54 dépassements de la norme tunisienne relative à l'O₃ (annexe VI) ont été enregistrés entre 2005 et 2011 dans les stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis.

Les fortes concentrations de l'O₃ sont associées à des conditions climatiques et météorologiques qui favorisent la production de ce polluant et restreignent leur dispersion et leur dilution.

VII. 2. 1. Épisodes photochimiques estivaux associés à des brises de mer

Huit dépassements de la valeur limite relative à l'O₃ (235 µg/m³, moyenne sur une heure) ont été enregistrés à la station de mesure de la qualité de l'air de La Manouba en 2008, et cela pendant 2 jours : le 29 et le 31 août. Pendant cet épisode, les niveaux d'O₃ ont largement dépassé les normes tunisiennes et ont enregistré le taux le plus élevé de toute la période d'étude (2005-2011) : 513 µg/m³ le 29 août 2008.

Au mois d'août comme aussi pour le mois de juillet, c'est le régime de séance unique de travail en Tunisie. Donc la variabilité des concentrations des polluants primaires puis d'O₃ est différente de celle des autres mois dits « double séance de travail ».

La région de La Manouba est une zone à vocation résidentielle, il y a absence d'industrie polluante, la circulation bien qu'importante pendant les heures de trafic, reste moins importante que dans le centre-ville de Tunis ce qui limite la présence des polluants NO_x et défavorise la photolyse de l'O₃.

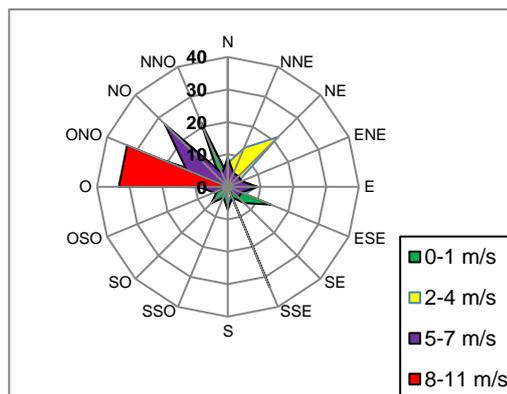
- Caractéristiques de la température au mois d'août 2008

Le mois d'août 2008 a été un mois très chaud. La température maximale absolue a été de 41°C et la minimale absolue de 19°C avec une moyenne mensuelle de 32°C. Cette année-là détient le plus grand nombre des jours à « très forte chaleur » pour la période d'étude (2005-2011) avec 25 jours, ainsi que le plus grand nombre de vagues de chaleur dont deux au mois d'août : du 17 au 28 août 2008.

- Caractéristiques du vent dans le Grand-Tunis en août 2008

La rose des vents mensuelle du mois d'août 2008 de la station de Tunis-Carthage est construite à partir des mesures des observations : à 12h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h, heure locale à Tunis. Aucun vent très fort n'a été signalé durant ce mois, c'est que toutes les vitesses sont inférieures à 12 m/s. Une prédominance du vent modéré (2-4 m/s) qui représente 56 % du total des vitesses, les vents faibles ou le calme (0-1 m/s) représentent 23 % des cas. Le vent assez fort (5-7 m/s) représente 18 % essentiellement de direction nord-ouest. Tandis que le vent fort (8-11 m/s) ne représente que 3 % (Fig. 81).

Figure 81 : Rose des vents pour les tranches de vitesses : 0 à 1, 2 à 4, 5 à 7 et 8 à 11 m/s à la station de Tunis-Carthage au mois d'août 2008. (Source des données : INM).



- Variabilité d'O₃ en relation avec les NO₂

La variabilité du taux d'O₃ du jeudi 28 au dimanche 31 août 2008 à la station de La Manouba (station urbaine sous influence trafic) traduit assez fidèlement l'influence des trafics automobiles de proximité sur la concentration d'O₃. Deux pics de NO_x, bon traceur du trafic routier, sont enregistrés le matin et l'après-midi, suivis d'une augmentation progressive d'O₃. Les pics des deux polluants suivent une variation entre jours ouvrables (ici, jeudi et vendredi), jours semi-ouvrables (samedi) et le jour de vacance (dimanche).

Le matin des jours ouvrables, les pics de NO_x sont enregistrés entre 7h et 9h avec l'aller des gens au travail. Les pics de NO_x enregistrés sont : le 28 août (176 µg/m³), le 29 août (235 µg/m³) et le 30 août (260 µg/m³). L'après-midi, les pics sont enregistrés à 16h durant les jours ouvrables, et à 13h durant le jour semi-ouvrable, ce qui correspond aux heures du retour à domicile. Les niveaux de concentration des NO_x, sont plus faibles que ceux du matin : le 28 août (36 µg/m³), le 29 août (82 µg/m³) et le 30 août (42 µg/m³). Le dimanche 31 août, le pic de NO_x matinal est enregistré à 10h (105 µg/m³) et le soir un pic de 75 µg/m³ enregistré à 22h. En été et surtout la fin de la semaine, les résidents quittent leur quartier très chaud le jour, pour se rafraîchir dans les banlieues côtières et animées, ils rentrent tard dans la nuit, ce qui peut expliquer le pic tardif de 22h de NO_x le dimanche (Fig. 82).

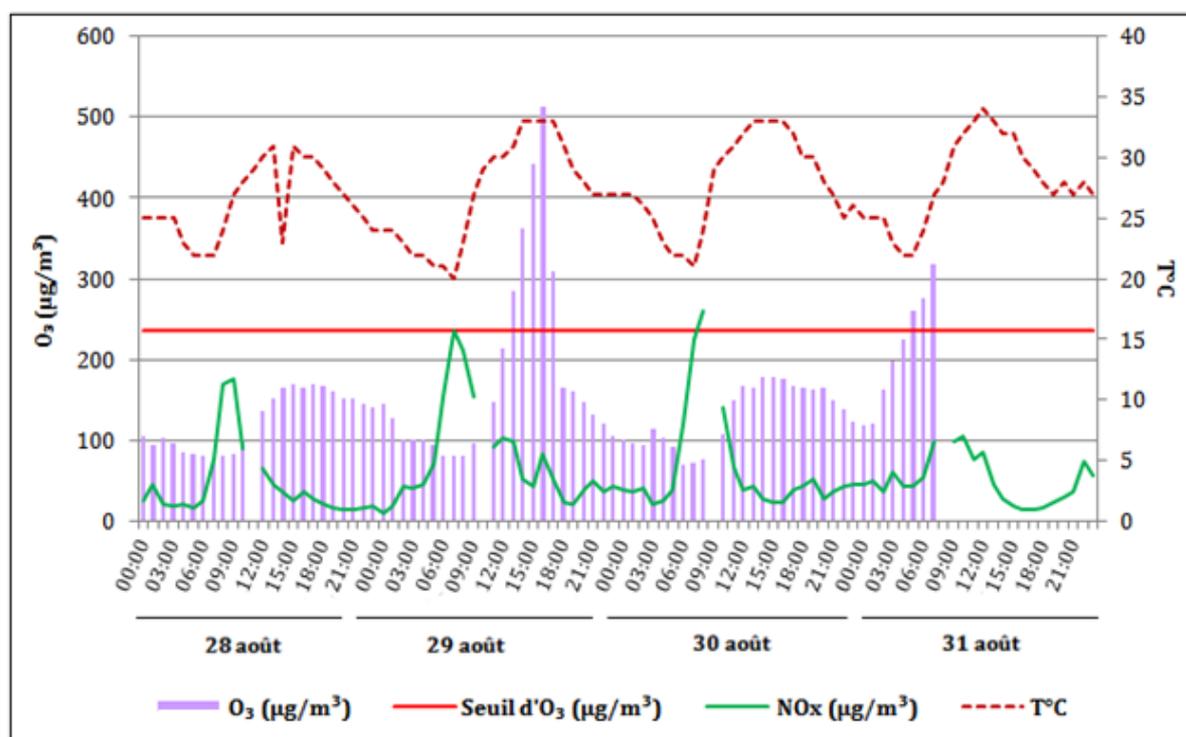


Figure 82 : Moyennes horaires de taux d'O₃ (µg/m³) et de NO₂ (µg/m³) à la station de La Manouba (ANPE), le seuil d'O₃ (235 µg/m³) et la température moyenne horaire (°C) à la station de Tunis-Carthage du 28 au 31 août 2008 (*Weather Underground*).

Deux heures ont été suffisantes pour augmenter les niveaux d'O₃ à La Manouba : les polluants primaires, notamment les NO_x, agissent avec le rayonnement solaire très fort et forment le polluant photochimique. Deux heures séparent le pic de NO_x et l'élévation des taux d'O₃.

Le 28 et le 30 août 2008, les niveaux de l'O₃ ne sont pas élevés, à cause des plus fortes concentrations en NO_x qui atteint un maximum de 260 µg/m³ le 30 août. Rien que, le 29 août, les niveaux de NO_x ne sont pas aussi élevés, mais 5 dépassements successifs ont été enregistrés l'après-midi du 13 à 17h : à 13h (285 µg/m³), à 14 h (361µg/m³), à 15 h (443µg/m³), à 16h (513µg/m³) et à 17 h (309µg/m³).

Le 31 août, les dépassements de la valeur limite relative à l'O₃ ont été enregistrés très tôt le matin entre 5h et 7h respectivement 261 µg/m³, 275 µg/m³ et 317 µg/m³. Pendant cette journée, les niveaux des NO_x aux heures qui précèdent les dépassements ont été très faibles, variant entre 15 et 105 µg/m³.

La variabilité du polluant primaire NO_x, jouant certainement un rôle, mais seul, il ne peut pas expliquer les surconcentrations de l'O₃.

- Les caractéristiques du vent du 28 au 31 août 2008

Du 28 au 31 août 2008, le vent enregistré à la station de mesure de la qualité de l'air de La Manouba a été très faible à modéré, ne dépassant pas 3 m/s avec un taux de situation calme de 34 %. Le vent soufflait essentiellement du quadrant est (NE, ENE, E, ESE, SE) (Fig. 83).

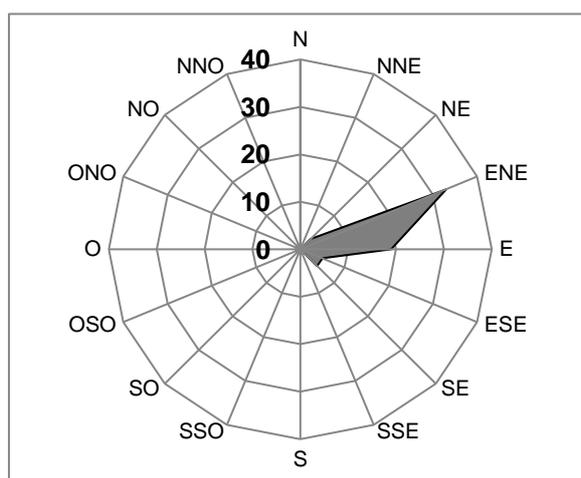


Figure 83 : Fréquence des directions du vent à la station de la qualité de l'air La Manouba du 28 au 31 août 2008 (Calme : 34 %). (Source des données : ANPE)

A la station météorologique de Tunis-Carthage (située à l'est de la station de la qualité de l'air La Manouba), la situation est aussi calme pendant cette période (du 28 au 31 août 2008). Les vents modérés (2 à 4 m/s) prédominent, ils représentent 48 % du total des vitesses et soufflent essentiellement du secteur nord-nord-est ou est (Fig. 84).

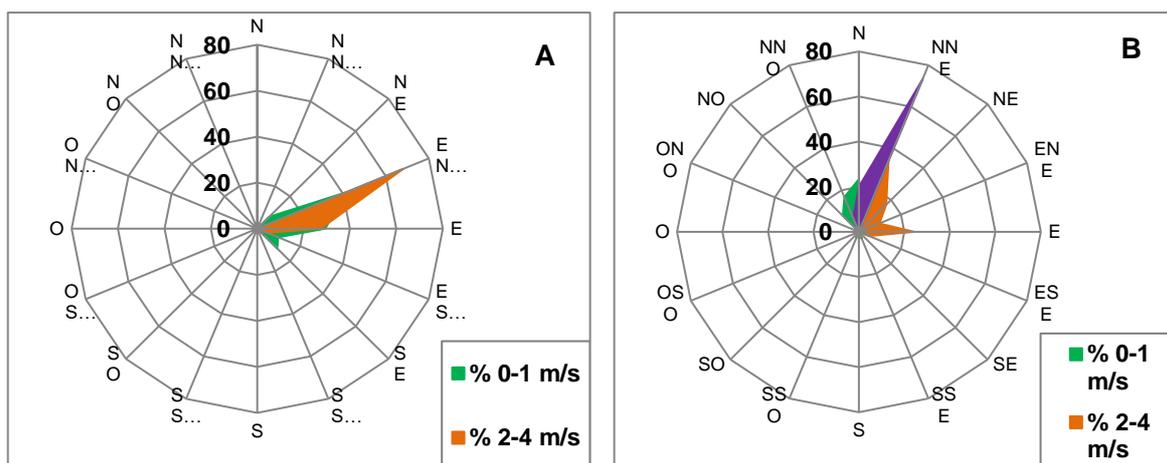


Figure 84 : Roses de vent selon la vitesse à la station La Manouba (A) (ANPE) et à la station de Tunis Carthage (B) du 28 au 31 août 2008. (Source des données : INM).

Les vents assez forts (5-7 m/s) ne représentent que 17 % et soufflent du nord et nord-nord-est. Les vents faibles (0-1 m/s) représentent 35 % et soufflent surtout du nord et d'est.

À La Manouba, comme à Tunis-Carthage, les vents faibles et les situations calmes sont repérés en phase nocturne. Ils sont caractéristiques de la brise de terre. L'oscillation horaire de la courbe d'O₃, entre une phase nocturne calme avec faibles taux d'O₃, une phase diurne plus ou moins dynamique associée à une élévation des taux d'O₃ ainsi que la direction du vent témoignent du rôle de la brise de mer dans la distribution spatiale de ce polluant (Fig. 85).

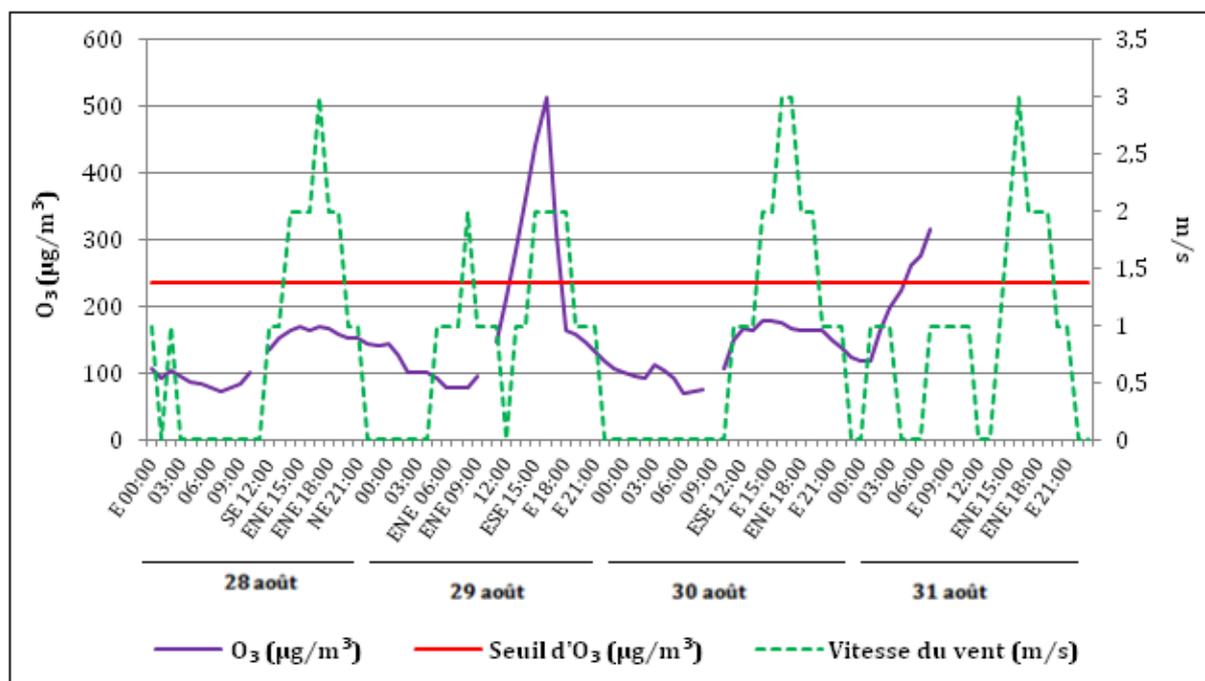


Figure 85 : Concentrations horaires de l'O₃, le seuil de l'O₃ (235 µg/m³), les vitesses horaires et les directions du vent à la station urbaine de La Manouba du 28 au 31 août 2008. (Source des données : ANPE).

Avec les mêmes conditions météorologiques, les concentrations horaires moyennes d'O₃ dans le reste des stations du Grand-Tunis, montrent que (Fig. 86) :

- Les niveaux d'O₃ sont plus élevés dans les stations urbaines (La Manouba et Ghazela) ;
- La station de Radès bien que de type urbain, représente les taux les plus faibles d'O₃ tout comme la station de proximité de zone industrielle de Ben Arous. Ces deux stations sont sous le vent des polluants primaires des zones industrielles qui les entourent, ce qui défavorise la formation d'O₃ ;
- La station périurbaine du Parc Ennahli présente des niveaux importants d'O₃, mais sans dépasser les normes, et cela grâce à son site topographiquement plus dégagé que celui de La Manouba, donc l'O₃ est aussitôt formé et évacué. Néanmoins, la station de La Manouba, est sous le flux des secteurs est. Des quantités énormes du polluant secondaire de Ghazela et Ennahli ont été transportées et ajoutées aux quantités produites dans la région de La Manouba. Ces flux de polluant sont piégés au niveau de « Jbal Ammar » ce qui a accentué l'accumulation du polluant.

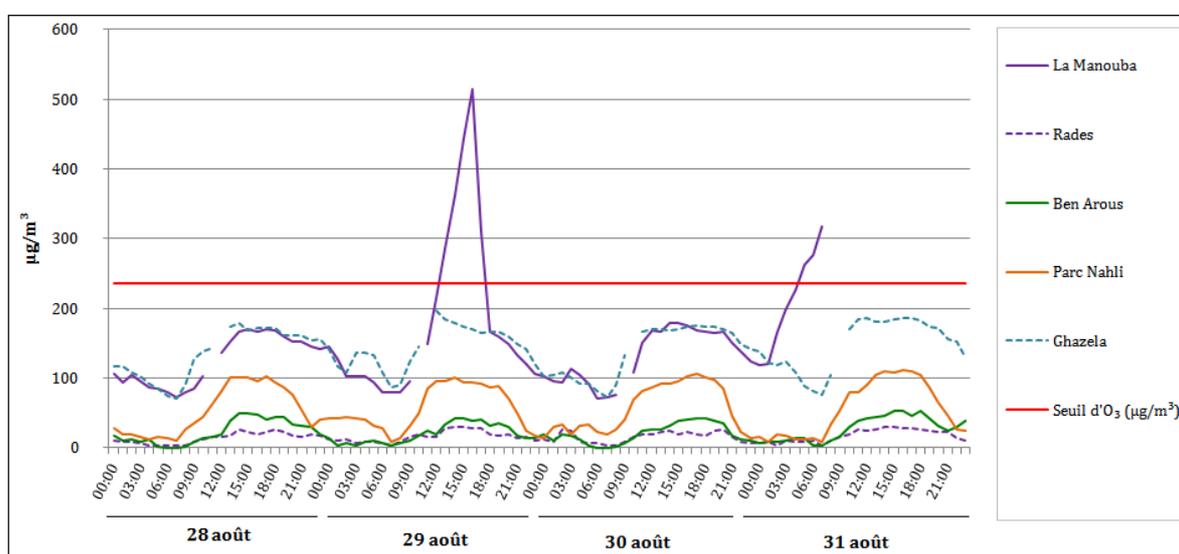


Figure 86 : Concentrations horaires moyennes dans 5 stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis du 28 au 31 août 2008. (Source des données : ANPE).

- Situation de marais barométrique persistante

Les données météorologiques observées à la station de La Manouba pendant cet épisode photochimique montrent une situation atmosphérique très stable. Le ciel est de temps à autre nuageux, ou bien épars la journée durant. Cette situation radiative a favorisé la stagnation de l'O₃ (Fig. 87).

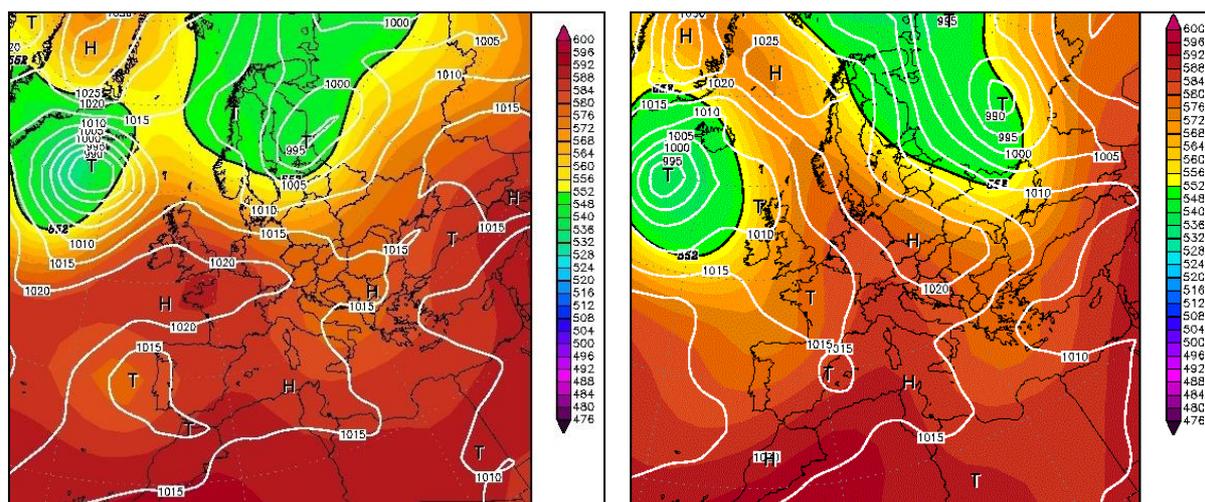


Figure 87 : Organisation des champs barométriques du 29 (à gauche) et du 31 (à droite) août 2008 à 00 h. (Source : wetterzentrale.de).

VII. 2. 2. Épisodes photochimiques printaniers très stables liés à des brises de mer et de terre

- La Manouba

Du 27 avril au 1^{er} mai 2008, à la station de qualité de l'air La Manouba, l'épisode photochimique a été exceptionnel en intensité et en durée pendant une période de l'année où la production photochimique n'est pas la plus forte. La concentration de l'O₃ a dépassé la valeur limite (235 µg/m³, moyenne sur une heure) 20 fois, soit 69 % du nombre de dépassements de cette année. Cette période de 5 jours, dont 4 qui enregistrent tous les dépassements, mais, seuls deux jours ouvrables. Elle débute le dimanche et se termine aussi par un jour de congé, c'est la fête du travail du 1^{er} mai.

Le dimanche 27 avril, du 11h00 à 18h00, les valeurs de l'O₃ ne cessent de s'élever, allant de 235 µg/m³ à 11h pour atteindre un maximum de 249µg/m³ à 17h00. La température moyenne journalière a été supérieure à la moyenne du mois d'avril, soit 28°C. Le mercredi 30 avril, 4 dépassements du seuil d'alerte ont été enregistrés : à 17h00 (245µg/m³), à 18h00 (243 µg/m³), à 22h00 et à 23h00 (247µg/m³). La température a varié entre 11°C et 33°C. Une forte humidité relative (un maximum de 89 %) les premières heures du matin a caractérisé cette journée et qui s'affaiblit l'après-midi puis augmente la nuit (Fig. 81). Les taux les plus élevés de l'O₃ coïncident avec la période la plus sèche de la journée, une température élevée et une humidité faible inférieure à 30 % (Fig. 88).

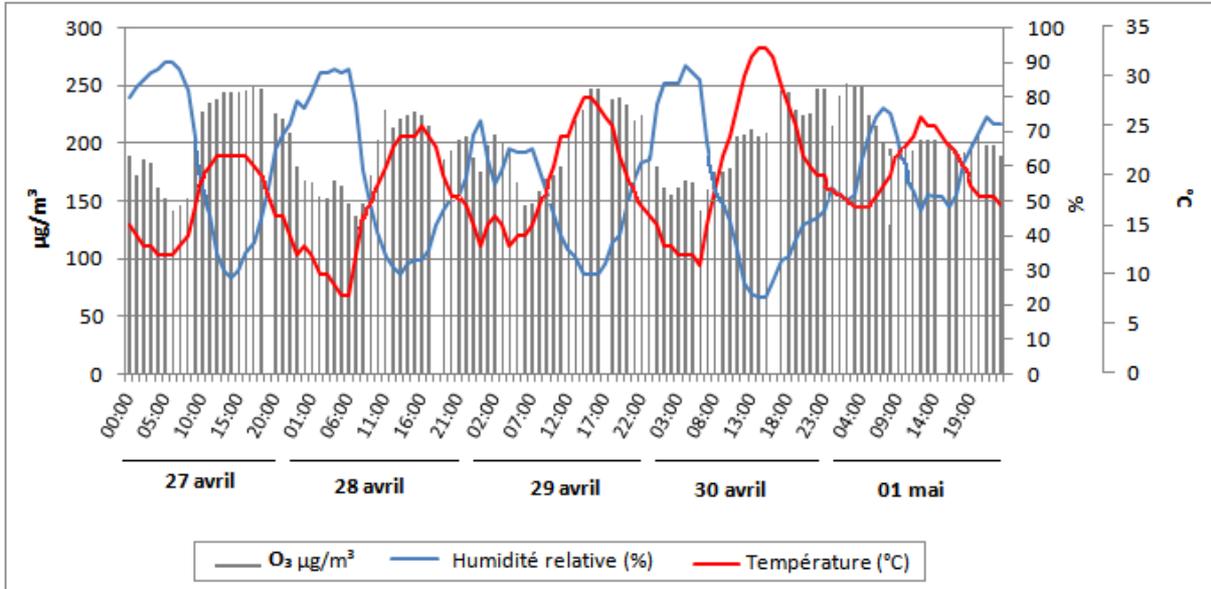


Figure 88 : Concentrations horaires d'O₃ (µg/m³), humidité relative et température de l'air ambiant (°C) à la station ANPE La Manouba, du 27 avril au 1^{er} mai 2008. (Source des données : ANPE).

Un épisode se caractérisait par des vents faibles globalement inférieurs ou égaux à 3 m/s avec une direction dominante d'est ou d'est-nord-est à la station INM de Tunis-Carthage. La direction dominante est essentiellement du nord ou de l'est, le vent modéré prédomine avec 62 % suivie par le vent faible (25 %), le vent assez fort (22 %) et le vent fort ne représentent que 1 % (Fig. 89).

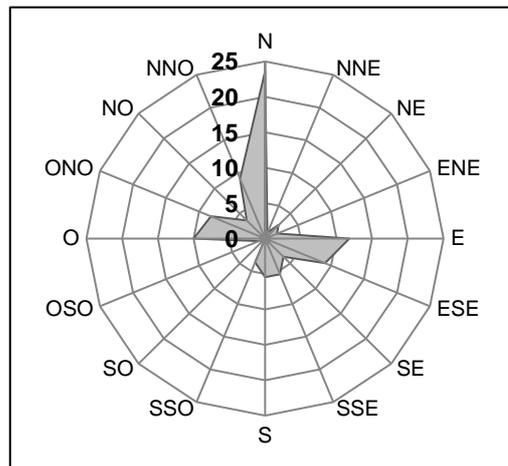


Figure 89 : Fréquences (%) de la direction du vent à la station urbaine de La Manouba du 27 avril au 1^{er} mai 2008 (Données : ANPE).

Cet épisode est lié à la brise de mer. Une brise est irrégulière et ralentie par le bâti (Fig. 90).

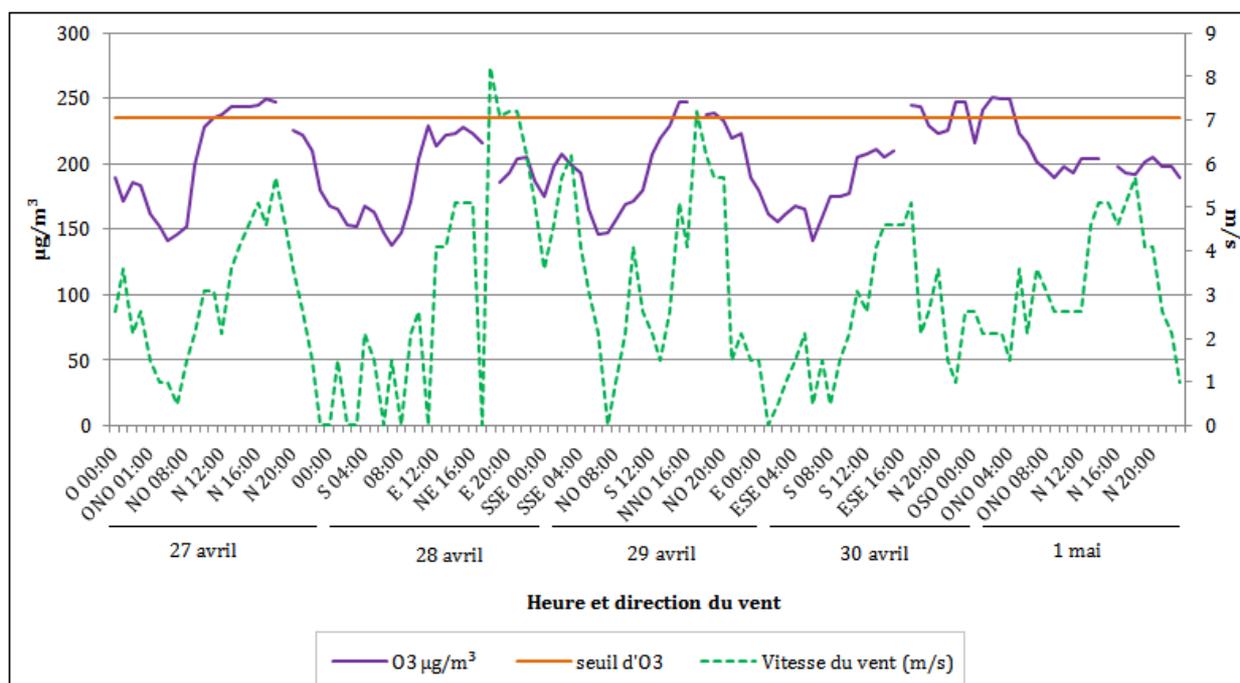


Figure 90 : Concentrations horaires de l'O₃ à la station ANPE La Manouba, le seuil de l'O₃ (235 µg/m³), les vitesses horaires et les directions du vent à la station INM de Tunis-Carthage du 27 avril au 1 mai 2008. (Source des données : ANPE et *Weather Underground*).

Le 1^{er} mai, une situation atypique créée par l'effet de la brise de terre soufflant de l'ouest qui va réacheminer les polluants vers la mer (vent d'ouest) produits le jour en ville et ramenés par la brise de mer à l'intérieur.

Les trois premiers jours de l'épisode, le temps est stable caractérisé par un ciel dégagé et les situations climatiques s'organisent en marais barométrique, avec des valeurs de la pression variant entre 1013 et 1015 hPa. Tandis que le 30 avril, la situation atmosphérique a été caractérisée par l'existence d'une haute pression sur le nord de la Lybie. Une autre haute pression centrée sur le nord de l'Espagne. Cet anticyclone a bloqué l'arrivée des perturbations venant de l'Europe vers la Méditerranée (Fig. 91). Il en résulte avec ces caractéristiques météorologiques très stables, des mouvements de subsidence permettant la surconcentration des polluants dans les basses couches de l'atmosphère.

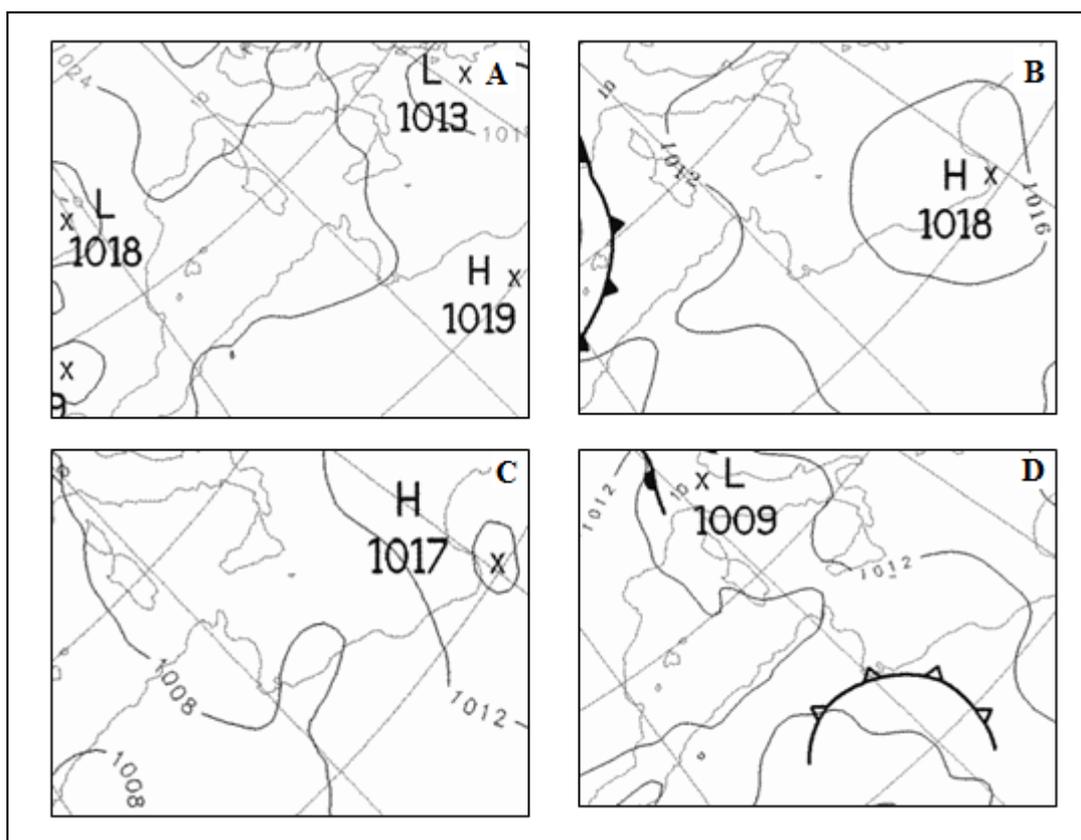


Figure 91 : Organisation des champs barométriques du 27 (A), 29 (B), 30 (C) avril et du 01 mai (D) 2008 à 00 h. (Source : wetterzentrale.de).

- Parc Mourouj

L'épisode photochimique du 29 au 30 juillet 2005 enregistré à la station périurbaine de Parc Mourouj a enregistré 3 dépassements de la valeur-limite relative à l' O_3 ($235 \mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne sur une heure) et un déclenchement du seuil d'alerte. Le vendredi 29 juillet, un premier dépassement apparaît à 20h avec une valeur de $255 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ suivie d'un autre dépassement à 21h avec $253 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$. Le samedi 30 juillet, le pic d'ozone a été de $249 \mu\text{g}/\text{m}^3$, à minuit et le mardi 02 août, le dépassement a été observé à 9h avec une valeur de $239 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ces épisodes photochimiques coïncident avec la plus grande vague de chaleur de l'année 2005 qui est classée 2^{ème} par son intensité de la période d'étude (2005-2011) avec $103,9^\circ\text{C}$ et qui a duré 13 jours. Durant cette période, les conditions météorologiques sont globalement identiques avec une température de l'air ambiant très élevée : une minimale de $25,9^\circ\text{C}$ et une maximale de $39,7^\circ\text{C}$ enregistrées le 29 juillet (Fig. 92). L'humidité relative relativement élevée entre 24 % et 89 %.

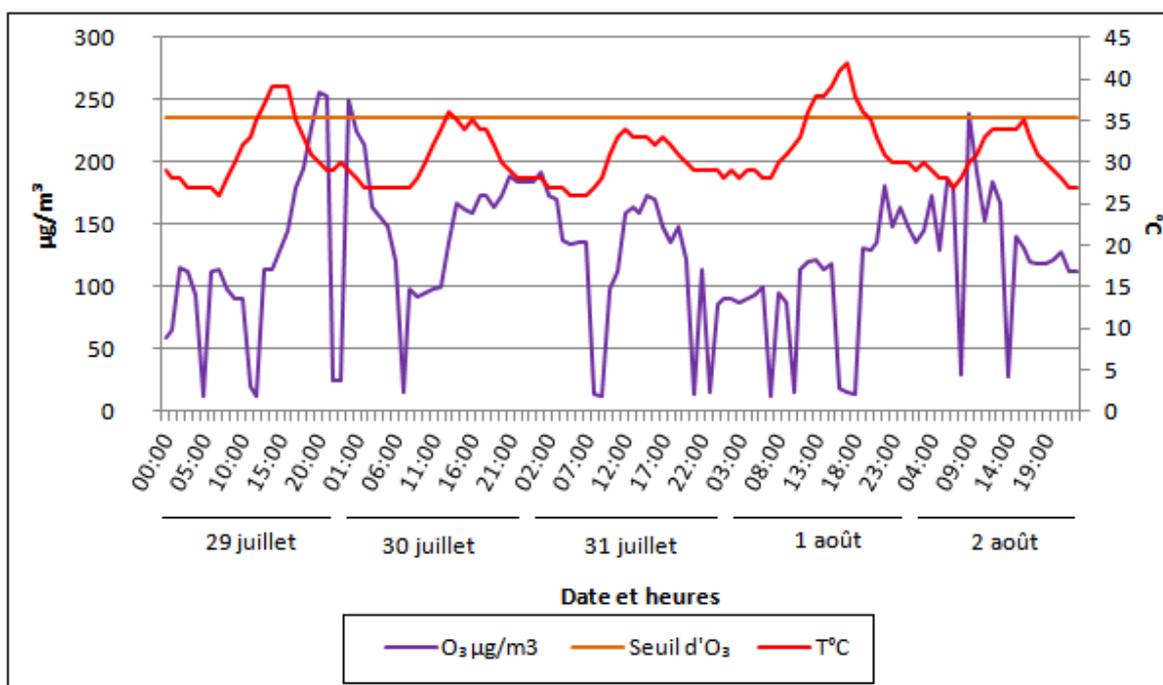


Figure 92 : Taux horaires moyens de l'O₃, le seuil relatif à la santé de l'O₃ (en µg/m³) à la station périurbaine Parc Mourouj et la température de l'air ambiant (°C) à la station INM de Tunis-Carthage du 29 juillet au 02 août 2005. (Données : ANPE et Weather Underground).

- Caractéristiques du vent

Fréquence de la direction du vent selon la vitesse du vent (m/s) à la station météo de Tunis-Carthage : Du 29 et 30 juillet 2005 (calme : 0 %) et 02/08/2005 (calme : 4%). (Fig. 93).

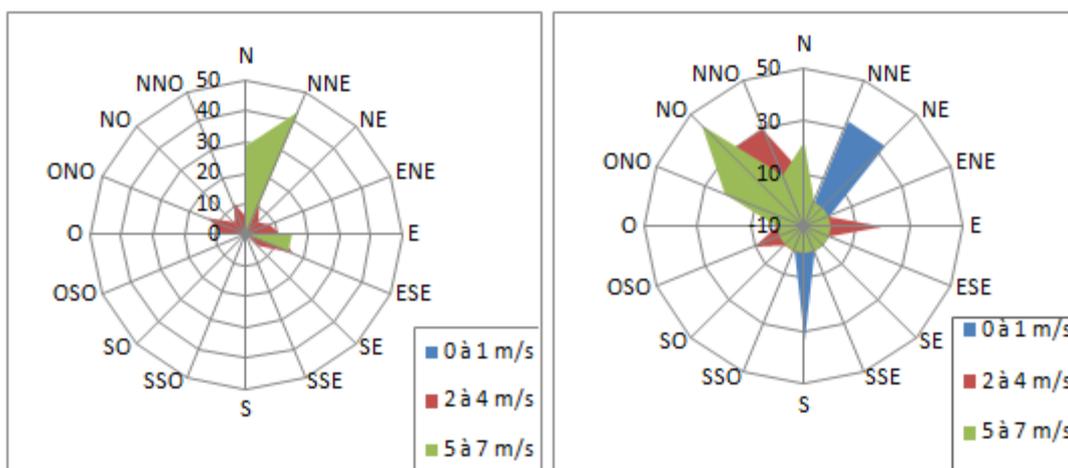


Figure 93 : Roses de vent horaire selon la vitesse (m/s) des épisodes photochimiques du 29 -30 juillet (à gauche) et du 2 août 2005 (à droite) à la station INM de Tunis-Carthage. (Données : ANPE et Weather Underground).

Trois dépassements sur quatre sont enregistrés le soir, à l'absence de l'ensoleillement nécessaire à la formation de l'O₃. Le 29 et 30 juillet, le taux de l'O₃ augmente lorsque la brise de mer ou un vent synoptique arrive et que ces flux transportent l'O₃. En effet, c'est un vent principalement d'origine synoptique qui déplace l'O₃ vers Parc Mourouj (Fig. 94).

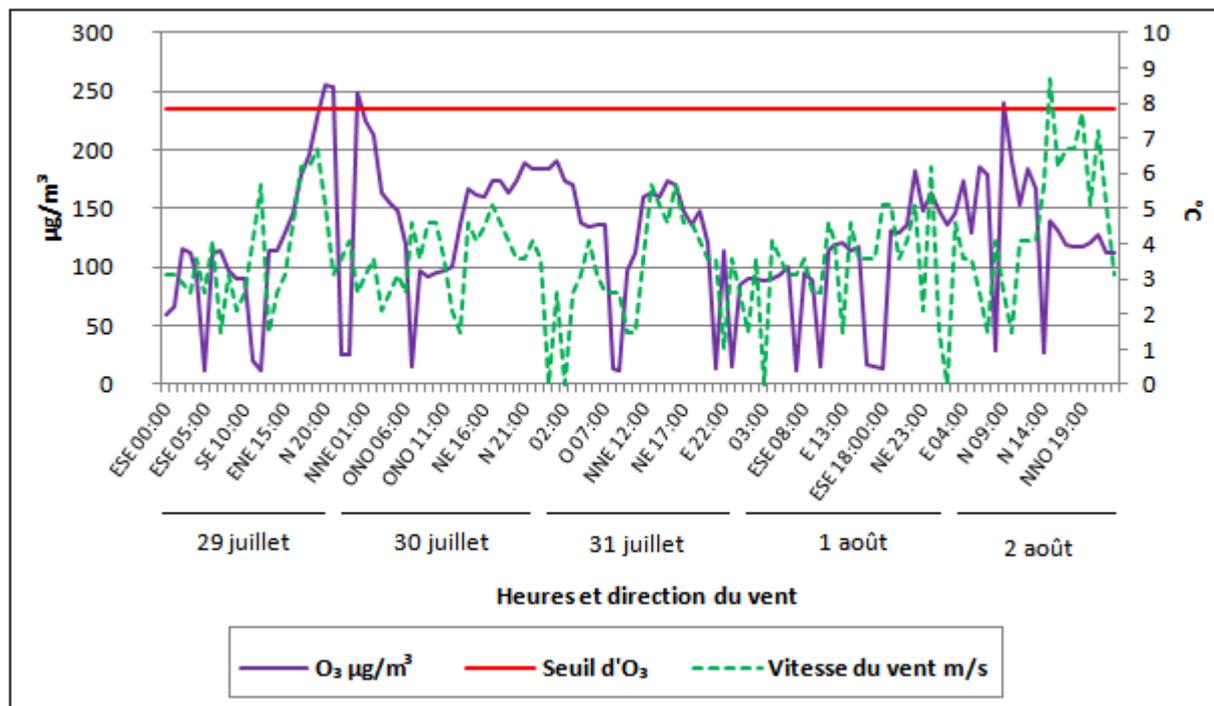


Figure 94 : Taux horaires moyens d'O₃, le seuil relatif à la santé d'O₃ (en µg/m³) à la station périurbaine Parc Mourouj, la vitesse (m/s) et direction du vent à la station INM de Tunis-Carthage du 29 juillet au 02 août 2005. (Données: ANPE et Weather Underground).

Durant ces journées de surconcentration photochimique, la situation est anticyclonique sur le nord de la Tunisie avec un ciel alternant entre dégagé et partiellement nuageux (Fig. 95).

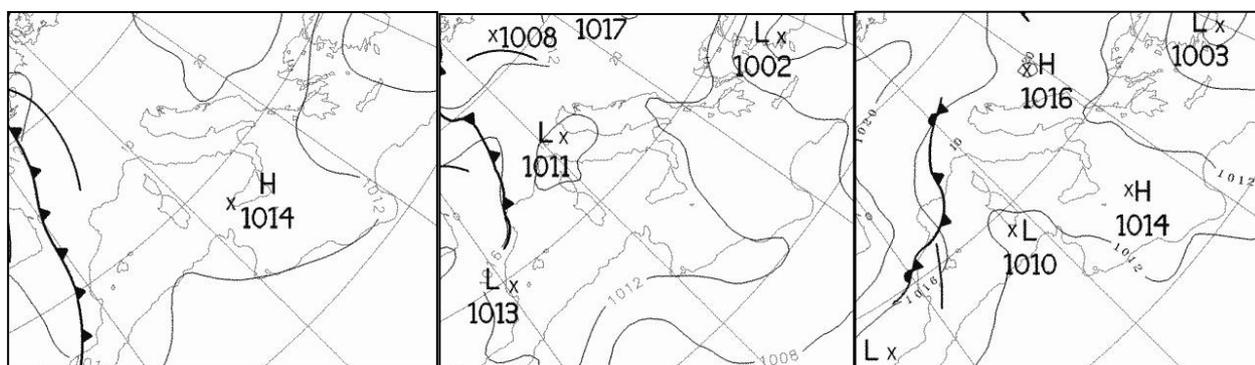


Figure 95 : Organisation des champs barométriques du 29 juillet (à gauche), du 30 juillet (au milieu) et du 2 août à 00 h. (Source : Wetterzentrale).

VII. 2. 3 : Épisodes photochimiques estivaux correspondants à des situations atmosphériques stables

En 2007, quatre dépassements du seuil d'alerte ($235 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ont été enregistrés. Le mercredi 13 juin, un dépassement à 7h00 du matin avec une valeur de $239 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Deux jours de suite ont enregistré deux dépassements à la même heure, à 7h00 : le 23 et le 24 juillet avec respectivement, $239 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $255 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Un dépassement est enregistré aussi le 21 novembre à 10h00 avec une valeur de $251 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La plus forte valeur d'ozone de toute l'année a été enregistrée le mardi 24 juillet 2007, à 7h00 du matin, avec une valeur de $255 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cette journée estivale a été chaude et très sèche, la température journalière moyenne a été de 36°C (Fig. 96) et l'humidité relative moyenne a été de 27%.

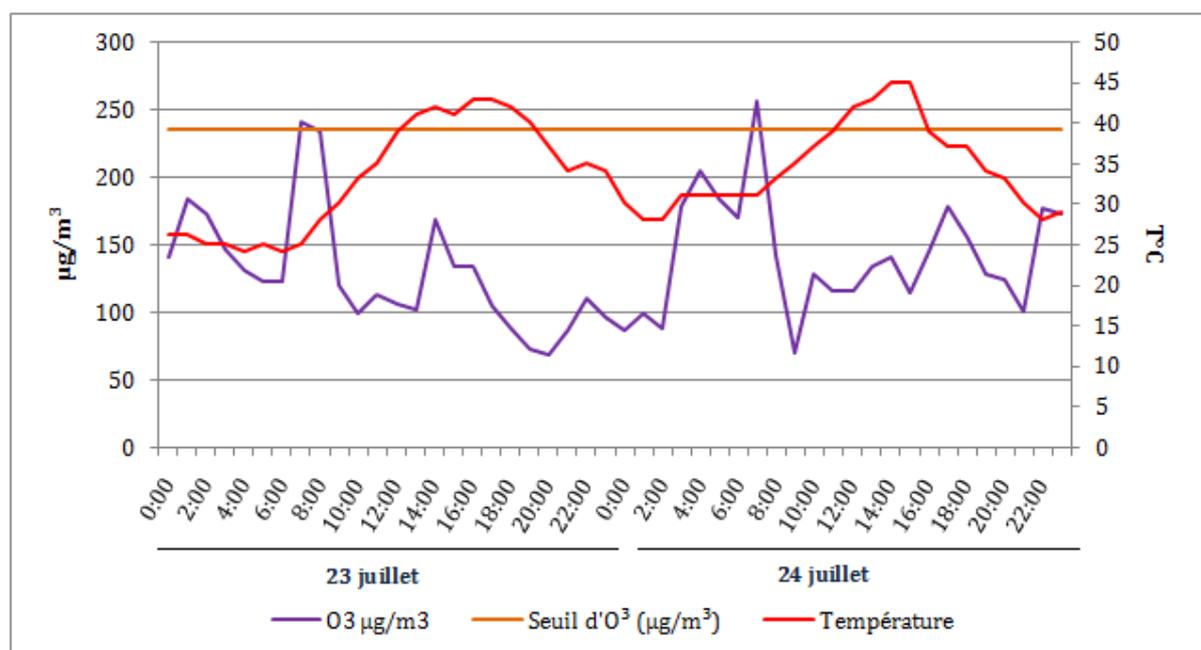


Figure 96 : Concentrations horaires et seuil d'O₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station périurbaine du Parc Mourouj (ANPE) et la température de l'air ambiant ($^\circ\text{C}$) à la station de Tunis-Carthage (*Weather Underground*), le 23 et 24 juillet 2007.

Les surconcentrations en ozone pendant les jours de dépassement des valeurs-limites se manifestent lors de situations des températures élevées qui dépassent parfois la moyenne du mois. Mais aussi avec une humidité relative relativement élevée.

Cet épisode photochimique (23 et 24 juillet 2007) est marqué par la présence d'une alternance entre brise de terre et brise de mer. Le 23 juillet, aux premières heures du matin, le vent horaire moyen a été très faible, ne dépassant pas 1.5 m/s avec une domination de secteur sud-est, et devient de direction sud à l'heure du pic à 7h00.

Le même phénomène, se réalise le 24 juillet, les premières heures du matin, un vent faible (entre 0.5 et 3.1 m/s) de direction est-sud-est domine puis devient de direction sud, à 7h00 l'heure du dépassement du seuil d'alerte. L'occurrence du vent du secteur sud à sud-est se produit à midi le premier jour et à 14h00 le deuxième jour, et c'est une brise de lac qui s'installe à la station de Tunis-Carthage, avant la brise de mer (Fig. 97). À la fin de la journée, le vent augmente pour atteindre un maximum de 9.3 m/s à 18h.

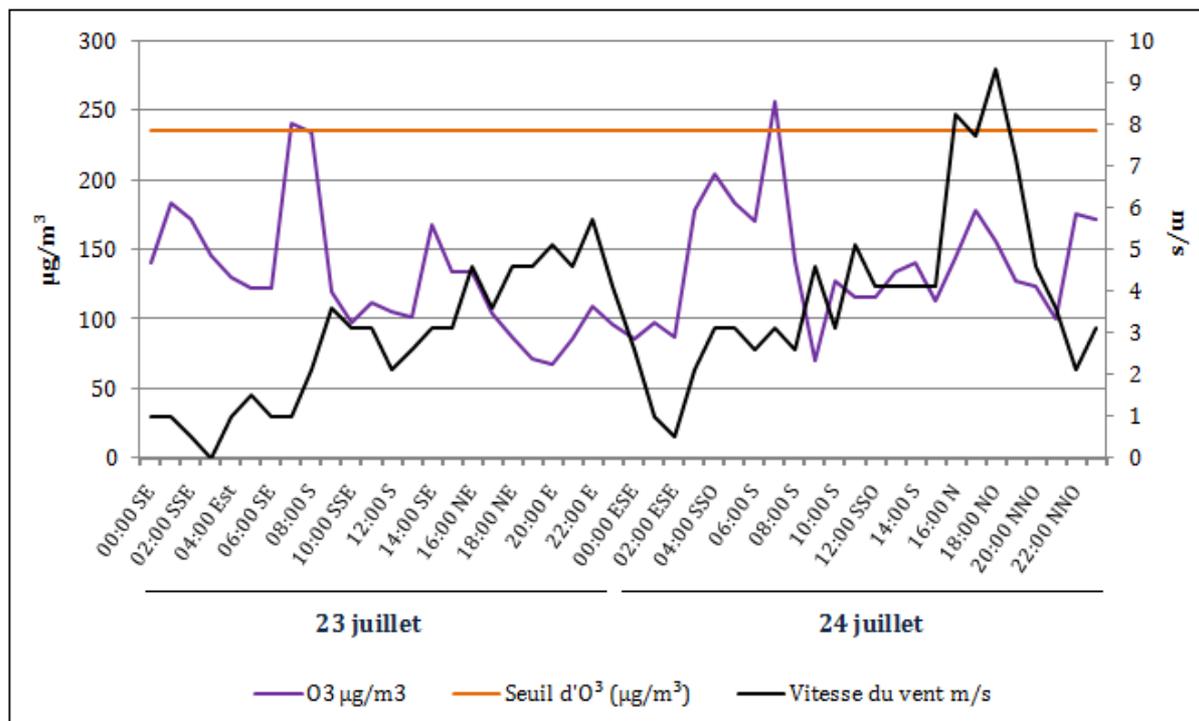


Figure 97 : Concentrations horaires d'O₃ (µg/m³) à la station du Parc Mourouj (ANPE), la vitesse et la direction du vent à Tunis-Carthage (*Weather Underground*) le 23 et 24 juillet 2007.

Pendant cet épisode, à la station de Tunis-Carthage, le vent horaire moyen a été faible ne dépassant pas 5.7 m/s, le vent dominant souffle des secteurs sud ou est-sud-est (Fig. 98).

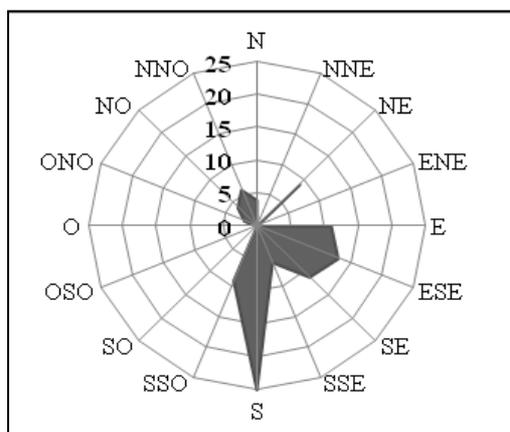


Figure 98 : Fréquence (en %) de la direction du vent le 23 et le 24 juillet 2007. (Données : *Weather Underground*).

Cet épisode photochimique s'explique donc par des conditions météorologiques stables : situation de marais barométrique, forte température et vent plus ou moins faible.

Les 23 et 24 juillet 2007 coïncident à un début de semaine de la séance unique (l'heure du travail est du 7.30 à 13h) donc, à 7h00 du matin, une grande affluence du trafic automobile sur la route nationale 3 (RN3) à 550 m de la station du Parc Mourouj. La nature périurbaine du site, loin des polluants primaires, notamment les NO_x qui activent

la photolyse et détruit l'O₃. Tous ces facteurs réunis sont favorables à la surconcentration de l'O₃ et défavorables à sa dispersion.

CONCLUSION

Ce chapitre a révélé l'importance de la pollution photochimique dans le Grand-Tunis :

- 54 dépassements de la norme tunisienne relative à l'O₃ (valeur limite fixée à 235 µg/m³, moyenne sur une heure) ont été enregistrés entre 2005 et 2011 dans les stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis ;

- 83 % des jours de dépassements de la valeur limite, ou jours de pic, ont été enregistrés entre les mois de mai et octobre. 60 % des jours coïncident avec un jour paroxysmique : 7 jours à « forte chaleur », 4 jours à « très forte chaleur » et un jour « torride » ;

- L'année 2008 a été une année exceptionnelle avec 29 jours de pic enregistrés à la station de La Manouba et ceux pendant 7 jours.

La variabilité des jours de pic de l'O₃ dans la semaine est sous l'effet des « jours ouvrables/*week-end* ». Elle suit le rythme du trafic automobile et la production des polluants primaires, nécessaire à la formation d'O₃. Une exception le *week-end* a été enregistrée à La Manouba avec 11 dépassements. Le principal facteur intervenant est la topographie du site.

Les épisodes photochimiques sont associés à des types de temps généralement stables liés à des brises de mer ou de terre qui favorisent la production de l'O₃ et restreignent sa dispersion et sa dilution.

Chapitre VIII : Épisodes de pollution aux PM10 et type de temps dans le Grand-Tunis

Dans ce chapitre, nous étudions la pollution particulaire. Nous allons délimiter les épisodes particuliers et caractériser la variabilité des pics des surconcentrations des polluants puis chercher des éléments d'explication de ces valeurs en mettant en relation les concentrations moyennes horaires des taux des PM10 avec les variables météorologiques, ainsi que les types de temps caractéristiques des jours de surconcentration des polluants particuliers.

VIII. 1. LES DEPASSEMENTS DES NORMES TUNISIENNES RELATIVES AUX PM10

Comme pour l'O₃, nous allons établir une comparaison entre le nombre de dépassements des seuils tunisiens et les recommandations de l'OMS relatifs aux PM10. Puis, nous calculons les poids des épisodes particuliers (Météo France ; Ben Boubaker, 2010), cela en cumulant le surplus des PM10 au-delà de la valeur-limite (260 µg/m³, moyenne journalière).

VIII. 1. 1. PM10 : dépassements à proximité des sources d'émission

Entre 2005 et 2011, la valeur-limite relative aux PM10 (260 µg/m³, moyenne journalière) a été dépassée 6 fois dans trois stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis (Beb Saadoun, Beb Alioua et Ben Arous). La valeur-guide (120 µg/m³, moyenne journalière), a, quant à elle était fréquemment dépassée pendant toutes les années dans toutes les stations qui présentent des mesures de PM10 (Beb Saadoun, Ben Arous, Ghazela, La Manouba et Beb Alioua) (Tab. 26 et Fig.99).

Tableau 26 : Dépassements des valeurs-guides (120 µg/m³, moyenne journalière) et des valeurs-limites (260 µg/m³, moyenne journalière) des PM10, nombre de jours et d'heures de mesure des PM₁₀ dans les stations du Grand-Tunis entre 2005 et 2011. (Source des données : ANPE).

Stations	Années	Nombre de jours de mesures complètes par année	Nombre d'heures de mesures par année	Valeur guide 120 µg/m ³ ≤	Recommandation de l'OMS ≤ 50 g/m ³	Valeur limite (relative à la santé) 260 µg/m ³ ≤	
				Nombre de jours de dépassements	Nombre de jours de dépassements	Nombre de jours de dépassements	Valeur moyenne journalière maximale (µg/m ³)
Beb Saadoun	2005	332	7947	38	290	0	195
	2006	315	7544	52	276	1	316
	2008	289	6916	26	246	0	190
	2009	315	7557	5	22	0	169
	2010	148	3534	8	109	0	249
	2006	54	1292	10	43	0	249

Ben Arous	2008	365	8741	25	272	0	183
	2009	341	8164	1	217	0	258
	2010	153	3653	28	114	2	269
Ghazela	2008	324	7754	36	174	0	229
	2009	295	7078	10	146	0	204
	2010	257	6163	3	92	0	170
		88	2099	37	64	0	212
La Manouba	2008	295	7058	58	192	0	224
	2009	353	8463	30	172	0	222
	2010	92	2206	13	47	0	Trop de lacunes
Beb Alioua	2008	361	8662	82	307	2	287
	2009	344	8241	6	102	1	498
	2010	202	4826	9	145	0	187

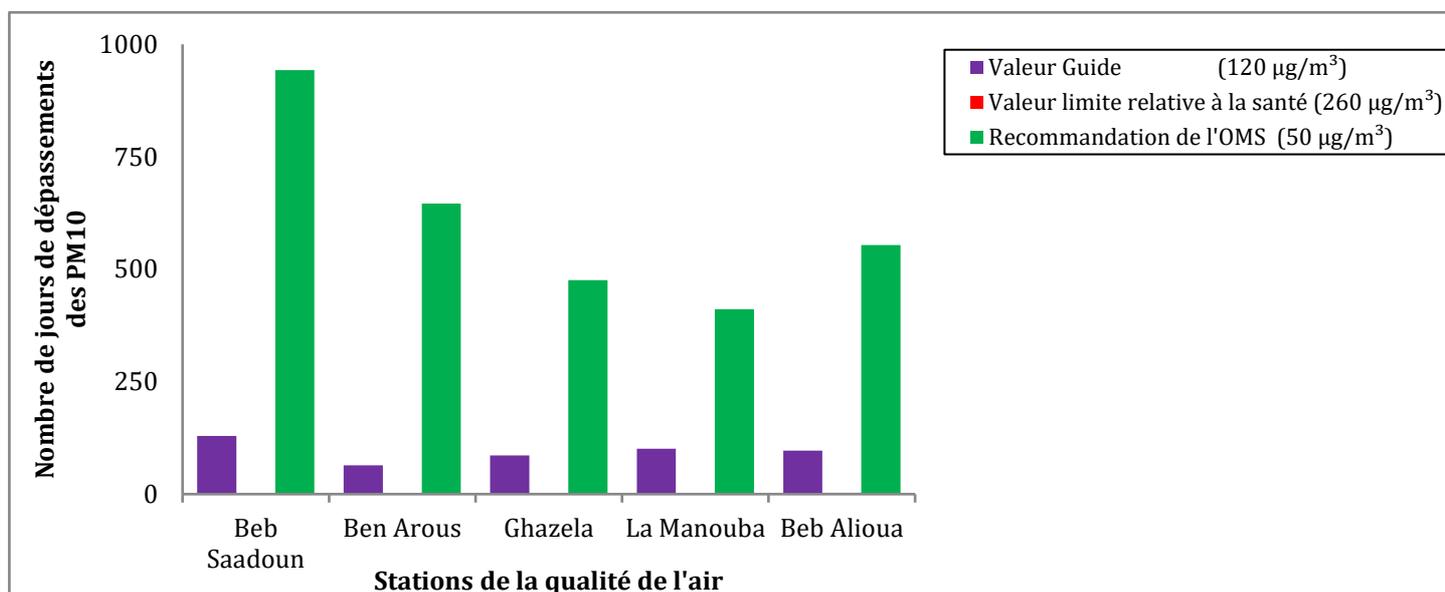


Figure 99 : Nombre de jours de dépassements des normes relatives aux PM10 (Valeur guide, valeur limite et la recommandation de l'OMS) de la période 2005-2011 dans les stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis. (Source des données : ANPE).

Le déclenchement du seuil d'alerte aux PM10 est exceptionnel, il est conditionné par le dépassement de la valeur limite ou de la valeur guide plus qu'une fois pendant 12 mois. Durant les 7 ans d'étude (2005-2011), ce seuil d'alerte a été déclenché deux fois dans le Grand-Tunis : en 2008 et 2010.

Les dépassements de la valeur-limite ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne journalière) relative aux PM10 sont observés à proximité des sources d'émission des particules, notamment dans les deux stations de proximité du trafic routier qui occupent les principales voies des zones d'activité : Beb Saadoun (un seul dépassement en 2006) et Beb Alioua (2 dépassements en 2008 et un seul dépassement en 2009) ainsi que dans la station de proximité industrielle de Ben Arous (2 dépassements en 2010) (Fig. 100).

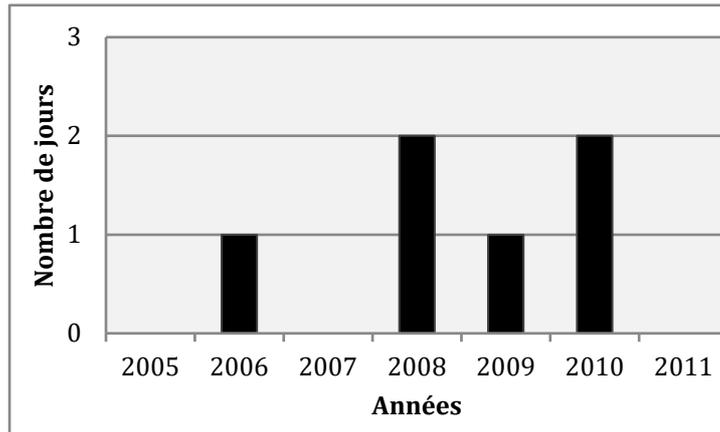


Figure 100 : Nombre de jours de dépassements de la valeur-limite relative aux PM10 ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne journalière). (Source des données : ANPE)

VIII. 1. 2. Classement des épisodes particuliers

Entre 2005 et 2011, nous recensons 5 épisodes particuliers dont le poids varie entre $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $238 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Du point de vue de sa persistance, l'épisode particulaire enregistré en 2010 a été le plus long avec 2 jours successifs (28 et 29 août 2010) mais avec un poids de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seulement. Tandis que le plus fort épisode particulaire a été de $238 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enregistré en un seul jour : le 03 février 2009 (Fig. 101).

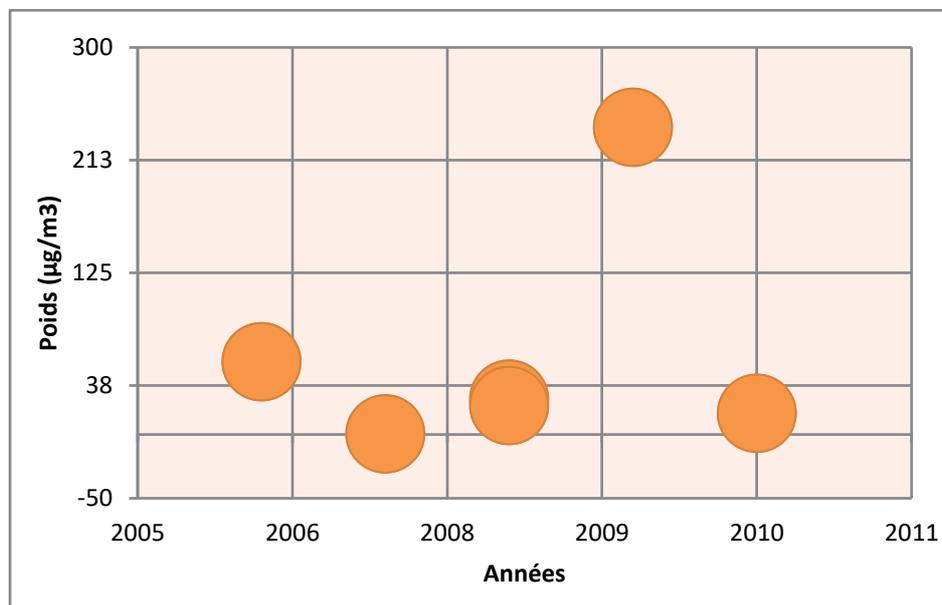


Figure 101 : Poids des épisodes particuliers ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de la période 2005-2011. (Source des données : ANPE). [Le cumul horaire des surplus des PM10 au-delà de la valeur-limite ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne journalière)].

VIII. 1. 3. Forte concentration particulaire durant la saison hivernale

Quatre sur six dépassements de la valeur limite-relative aux PM10 ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne journalière) ont été enregistrés en hiver contre deux dépassements en été (Tab. 27).

Un jour de dépassement hivernal coïncide avec un jour paroxysmique « frais ». Les deux dépassements estivaux coïncident avec deux jours de « forte chaleur » et de « très forte chaleur ».

Tableau 27 : Jours et taux de dépassement de la valeur-limite relative aux PM10 ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne journalière) dans les stations de Beb Saadoun, Beb Alioua et Ben Arous de la période 2005-2011. (Source de données : ANPE et INM).

Date du dépassement	Valeur du PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Température minimale absolue de la journée ($^{\circ}\text{C}$)	Température maximale absolue de la journée ($^{\circ}\text{C}$)	Type de paroxysme thermique
15 décembre 2006	316	9	20	-
10 janvier 2008	287	9	17	-
14 janvier 2008	282	6	17	Frais
03 février 2009	498	12	20	-
28 août 2010	269	23	38	Très forte chaleur
29 août 2010	267	24	31	Forte chaleur

Une connaissance des surconcentrations des polluants n'est guère interprétable si nous ne décrivons pas précisément les conditions d'obtention de ces mesures exceptionnelles. Cela va nous permettre, d'une part, de mieux identifier et surveiller l'origine des pollutions et d'autre part de mieux apprécier l'impact potentiel des concentrations sur la santé de l'homme.

VIII. 2. LES EPISODES DE POLLUTION PARTICULAIRES

Six dépassements de la valeur-limite ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne journalière) relative aux PM10 ont été enregistrés entre 2005 et 2010 dans le Grand-Tunis, et cela dans trois stations de la qualité de l'air : Beb Saadoun, Beb Alioua et Ben Arous.

Quatre situations atmosphériques ont été la cause de ces dépassements : une situation estivale par temps chaud et sec et avec des feux de végétations, et deux situations hivernales en situation anticyclonique et une situation perturbée avec vent de sable.

VIII. 2. 1. En été, des dépassements sont enregistrés par temps chaud et sec avec des feux de végétation

Deux jours consécutifs de dépassements de la norme tunisienne relative aux PM10 ont été enregistrés en été à Ben Arous, le samedi 28 et le dimanche 29 août 2010 avec des valeurs journalières respectivement de 269 et 267 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les facteurs de ces surconcentrations en PM10 sont doubles : anthropiques et atmosphériques.

Les dépassements de la valeur limite relative aux PM10 ont été enregistrés à la fin de la semaine alors que la majorité des usines de la zone industrielle ne fonctionnent qu'une demi-journée le samedi et ne fonctionnent pas le dimanche, donc l'effet des émissions des usines et du trafic routier est limité et d'autres sources peuvent également injecter des particules dans l'air notamment les incendies enregistrés pendant cet épisode et qui ont été au nombre de 5 à Morneg au sud de la station de la qualité de l'air de Ben Arous.

Le samedi 28 août est un jour de travail jusqu'à 12h. L'analyse de l'évolution moyenne horaire des taux des PM10 montre que les concentrations du polluant varient selon les mouvements pendulaires, donc l'influence des émissions des polluants des usines de la zone industrielle et du trafic automobile est repérée (Fig. 102).

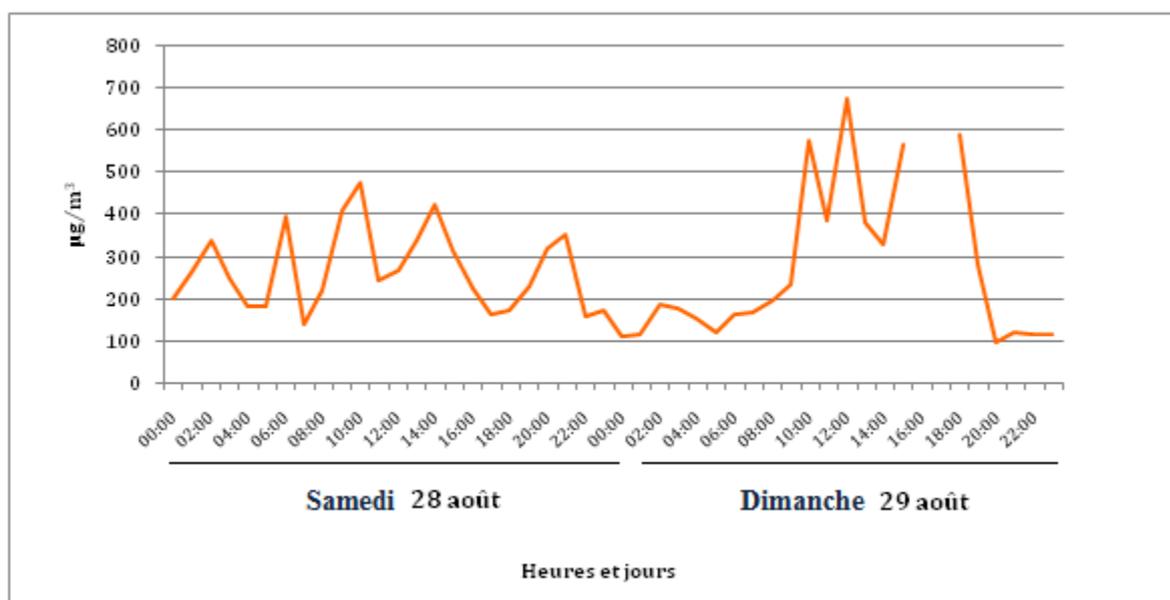


Figure 102 : Taux moyens horaires de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de Ben Arous le 28 et 29 août 2010. (Données : ANPE).

La station de Ben Arous, proche de la route A1 et relie le Grand-Tunis au sud de l'agglomération, est très fréquentée (nombre moyen journalier de véhicules entre 140 001 et 160 000). Deux pics sont caractéristiques durant cette journée, le premier à 10h (476 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) lié aux émissions des usines de la zone industrielle de Ben Arous mais aussi du trafic routier très actif à cette heure-ci.

À ces émissions s'ajoutent aussi les particules provoquées par le premier incendie à Morneg (déclenché à 7h et éteint à 9h) selon le. Le deuxième pic, enregistré à 14h (423 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), coïncide avec la sortie du travail, mais aussi probablement à l'effet du second incendie de la journée (déclenché à 12h et éteint à 16h) à Morneg au sud de la station ANPE. Après 14h, les niveaux des PM10 s'affaiblissent, donc cela indiquerait une grande

fluidité du trafic à cette période de vacances et la propagation des fumées des incendies loin de la station de la qualité de l'air de Ben Arous. La nuit, les niveaux des PM10 commencent à s'élever pour enregistrer un pic à 21h (353 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Le lendemain, le dimanche 29 août, le pic matinal est enregistré à 12h (677 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mais à 10h les niveaux des PM10 sont très élevés aussi (576 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) par rapport au jour précédent à la même heure. Les niveaux des PM10 restent élevés jusqu'à 18h. Si ces concentrations particulières peuvent être marquées par l'influence du trafic routier à la suite du départ des tunisois vers les plages et les régions les plus fraîches, elles sont encore plus marquées par les émissions des feux de végétations déclenchés pendant cette journée, notamment celui déclenché à 12h30' et éteint à 17h.

Les caractéristiques météorologiques pendant cet épisode ont été propices à la surconcentration des PM10. La situation atmosphérique a été très chaude et sèche avec un ciel dégagé. Les mesures à la station météorologique de Tunis-Carthage montrent des températures estivales élevées avec une température minimale de 22°C et une maximale de 38°C (Fig. 103) : deux journées paroxysmiques de « forte chaleur » et de « très forte chaleur ». Un temps sec avec une humidité relative moyenne de 43 % le 28 août et 51 % le 29 août (Fig. 104).

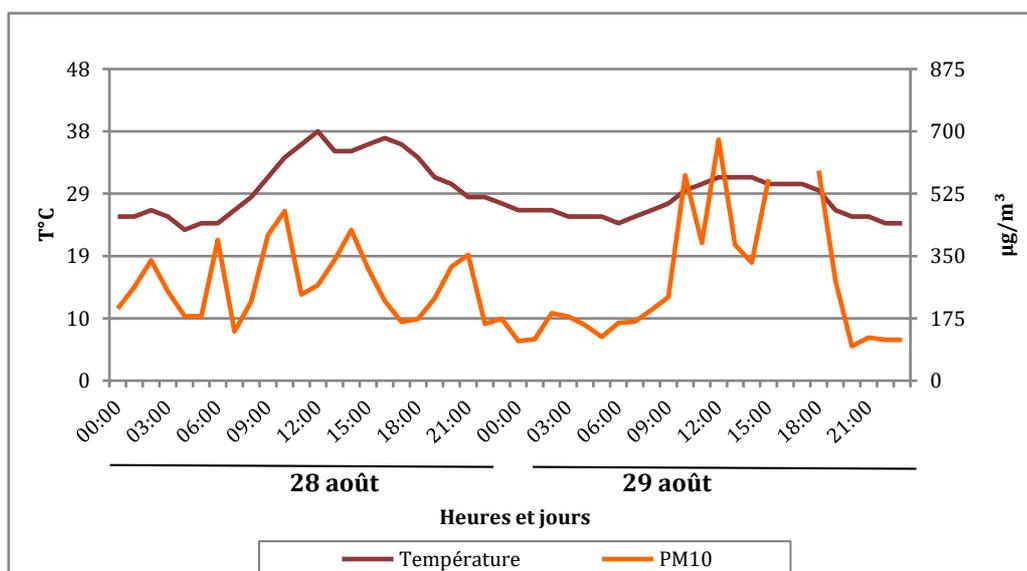


Figure 103 : Taux moyens horaires de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de Ben Arous (ANPE) et la température de l'air ambiant (°C) à la station de Tunis-Carthage le 28 et 29 août 2010. (Weather Underground).

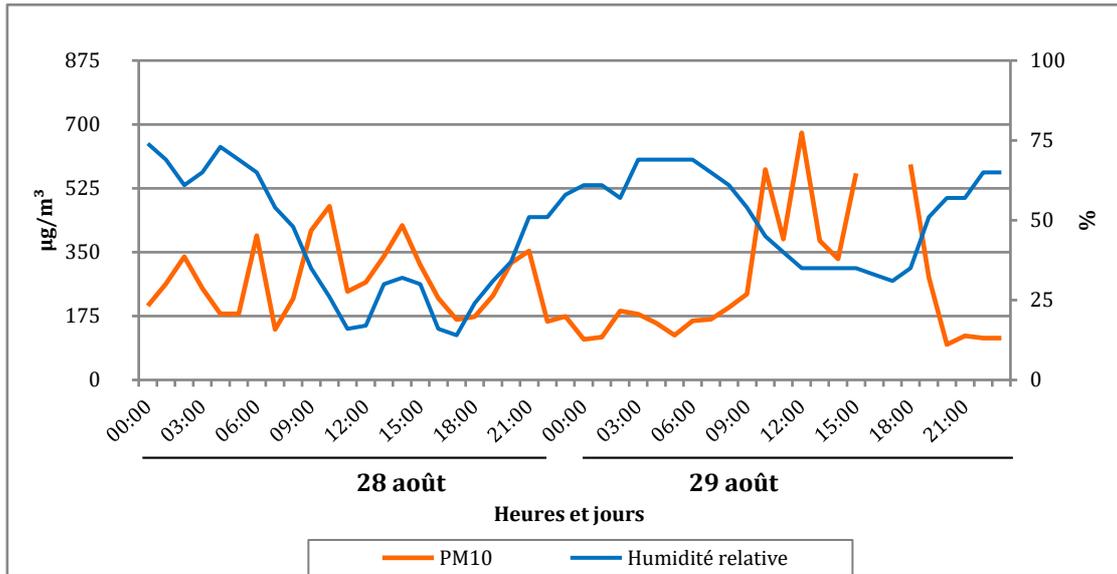


Fig. 104 : Taux moyens horaires de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de Ben Arous (ANPE) et l'humidité relative de l'air à la station de Tunis-Carthage le 28 et 29 août 2010. (*Weather Underground*).

Pendant cet épisode particulière, le vent horaire moyen à la station de Tunis-Carthage, a varié entre calme et une vitesse de 7,2 m/s, le 28 août, avec une direction dominante du nord-ouest ou ouest. Le 29 août, le vent dominant soufflait d'ouest avec une vitesse moyenne horaire atteignant 9,3 m/s (à 14h) (Fig. 105). Ce vent assez fort, surtout le 29 août, a aidé à la propagation rapide des feux de végétation. Tandis que le vent modéré qui a marqué la matinée du 28 août a empêché la propagation rapide des fumées du premier incendie et le pic matinal n'a été enregistré qu'à 10h, soit 3 heures du déclenchement de l'incendie et une heure après sa fin, bien que l'orientation du vent ait été du secteur sud et sud-sud-est, la direction de Morneg.

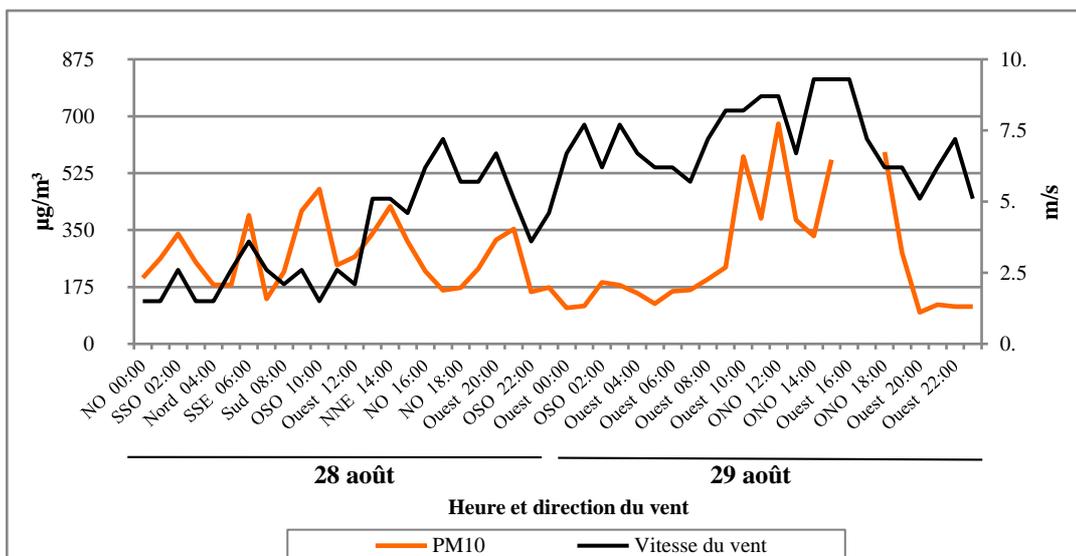


Figure 105 : Taux moyens horaires des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de proximité industrielle de Ben Arous (ANPE) et la vitesse du vent (m/s) à la station de Tunis-Carthage le 28 et 29 août 2010. (*Weather Underground*).

Le champ barométrique de surface relatif à la journée du 28 août 2010, montre que le Grand-Tunis est sous l'influence du flux de sud-ouest acheminant de l'air saharien très chaud et sec. La vitesse du vent à la station de Tunis-Carthage est faible le matin (ne dépassant pas 3,6 m/s) et se renforce un peu l'après-midi. A 13h la direction du vent change ainsi que sa vitesse en raison du changement du champ barométrique. Le ciel est clair toute la journée (Fig. 106).

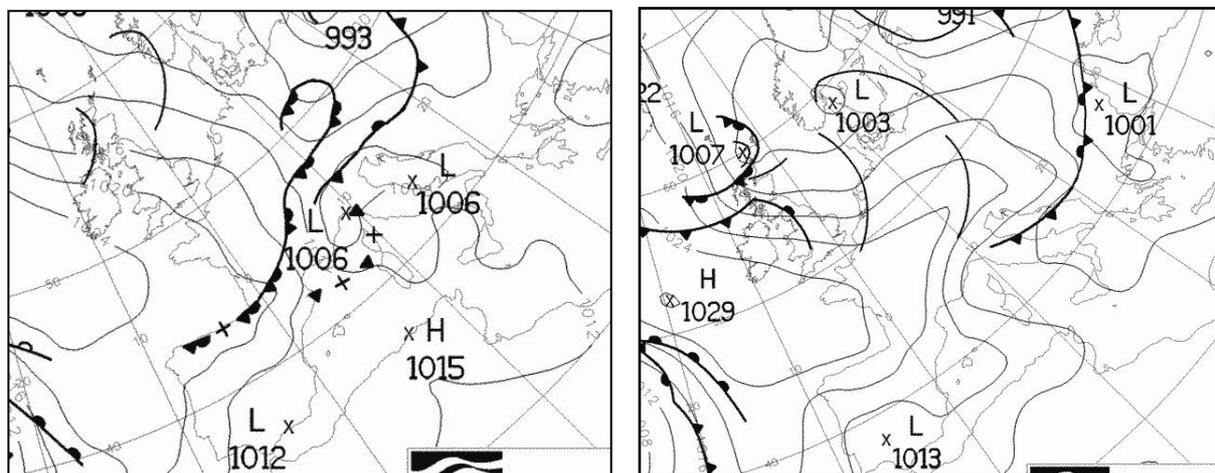


Figure 106 : Organisation des champs barométriques des 28 (gauche) et 29 (droite) août 2010 à 00h00TU. (Source : wetterzentrale.de).

VIII. 2. 2. Les épisodes de pollution hivernale

Quatre dépassements de la norme tunisienne relative aux PM10 ($260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne journalière) ont été enregistrés pendant la saison hivernale et cela dans les stations de proximité de trafic routier, Beb Alioua et Beb Saadoun, ainsi qu'à la station de proximité industrielle de Ben Arous. En hiver, les dépassements sont enregistrés par temps anticyclonique et par temps perturbé avec vent de sable.

VIII. 2. 2. 1. Type de temps anticyclonique hivernal

Ce type de temps anticyclonique concerne les journées du 10 et du 14 janvier 2008, ainsi que du 15 décembre 2006.

- Le 10 janvier 2008

L'analyse du graphique des niveaux de PM10 le jeudi 10 janvier 2008 enregistrés à la station de trafic routier de Beb Alioua montre que l'influence du trafic routier est peu marquée durant ce jour ouvrable et les concentrations horaires les plus élevées des substances particulières sont enregistrés l'après-midi avec un pic de $628 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à 19h (Fig. 107).

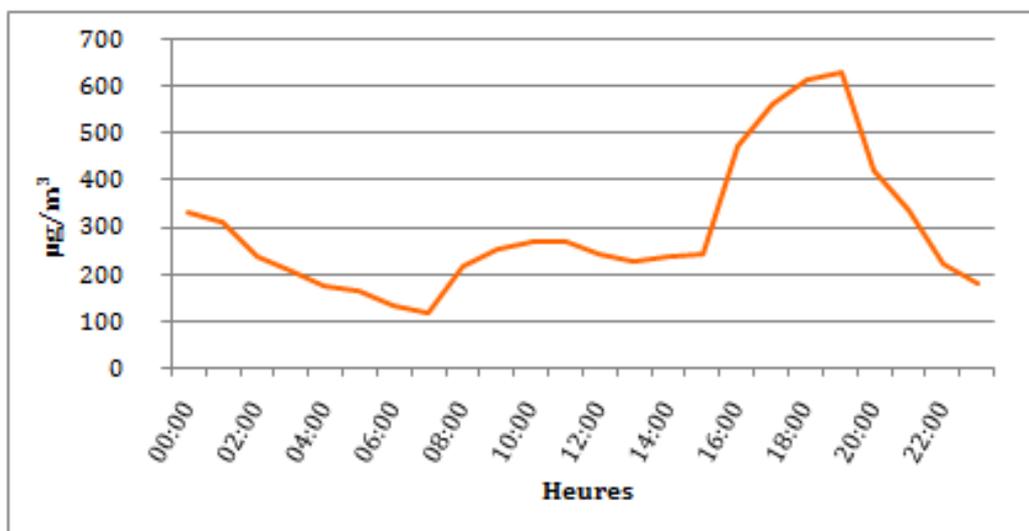


Figure 107 : Taux horaire des PM₁₀ (µg/m³) à la station de trafic routier de Ben Alioua le 10 janvier 2008. (Donnée : ANPE).

Les caractéristiques météorologiques de la journée sont très stables pendant cette journée hivernale. Une température moyenne de 13°C (un maximum de 17°C et un minimum de 9°C) (Fig. 108 A). Un air très humide avec une moyenne de 91% (Fig. 108 B).

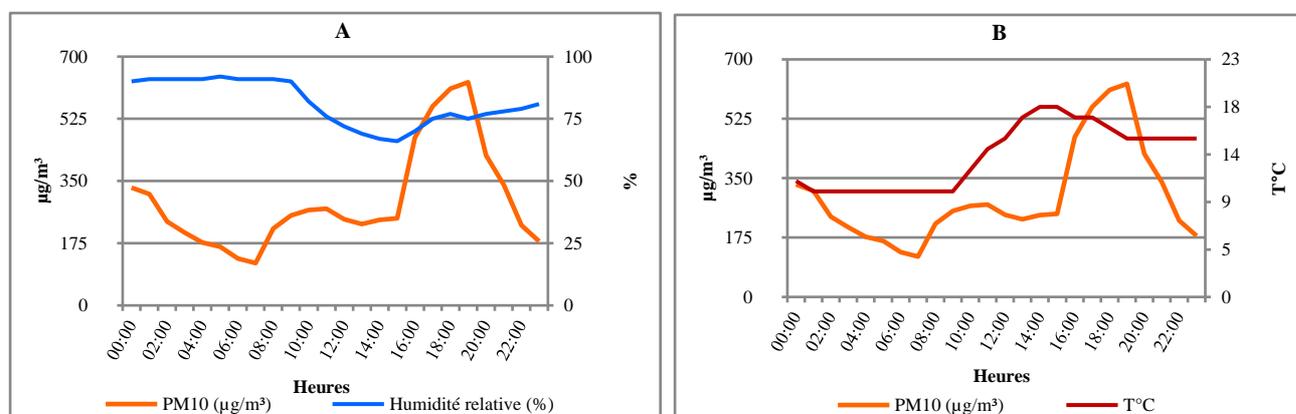


Figure 108 : Taux moyens horaires de PM₁₀ (µg/m³) (ANPE) le 10 janvier 2008 à la station de trafic routier de Beb Alioua (ANPE) et moyennes horaires de la température ambiante de l'air à la station de Tunis-Carthage (*Weather Underground*).

Le champ barométrique de surface relatif à cette journée se caractérise par un anticyclone. Le ciel est partiellement nuageux à nuages épars (Fig. 109).

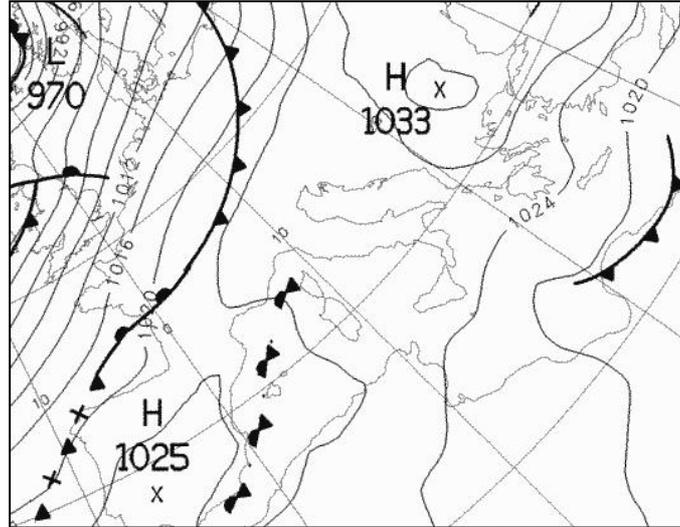


Figure 109 : Organisation des champs barométriques du 10 janvier 2008 à 00h00TU.
(Source : wetterzentrale.de).

A la station de Tunis-Carthage, la vitesse du vent était très faible le matin, ne dépassant pas 1,5 m/s et 3,6 m/s le soir. L'après-midi, la faible élévation de la vitesse du vent fut accompagnée d'une augmentation du taux de PM10. Il s'agit plutôt de brises que de vent synoptique. La nuit du 9 juin et la journée du 10 juin, le vent a soufflé de la terre avec une vitesse relativement faible variant entre calme et 2,1 m/s avec un changement de direction à 14h : c'est la brise de mer qui s'installe avec une domination E et ESE (Fig. 110).

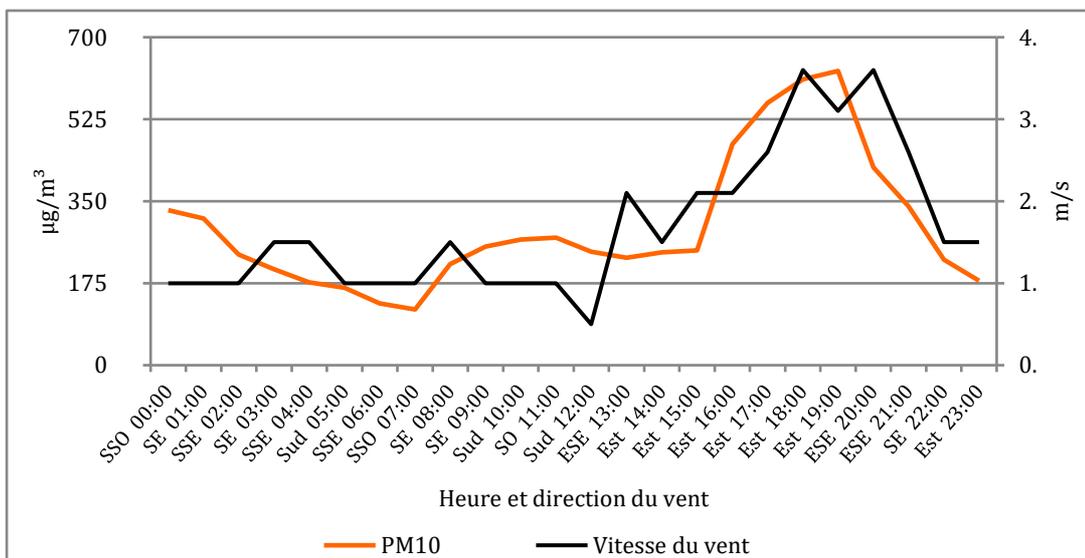


Figure 110 : Taux horaire des PM10 à la station de Beb Alioua (ANPE), la vitesse et la direction du vent à la station de Tunis Carthage le 10 janvier 2008 (INM).

En effet, c'est la stabilité atmosphérique caractéristique de ce genre de situations barométriques qui a favorisé la surconcentration des PM10.

- Le 14 janvier 2008

Le lundi 14 janvier 2008, le taux journalier de PM10 a été de 282 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La vitesse du vent a été plus élevée atteignant 10 m/s avec une direction dominante SE (Fig. 111). C'est un temps hivernal relativement chaud avec des températures moyennes quotidiennes variant entre 6°C et 17°C. Une humidité relative variant entre 48 % et 93 % (Fig. 112).

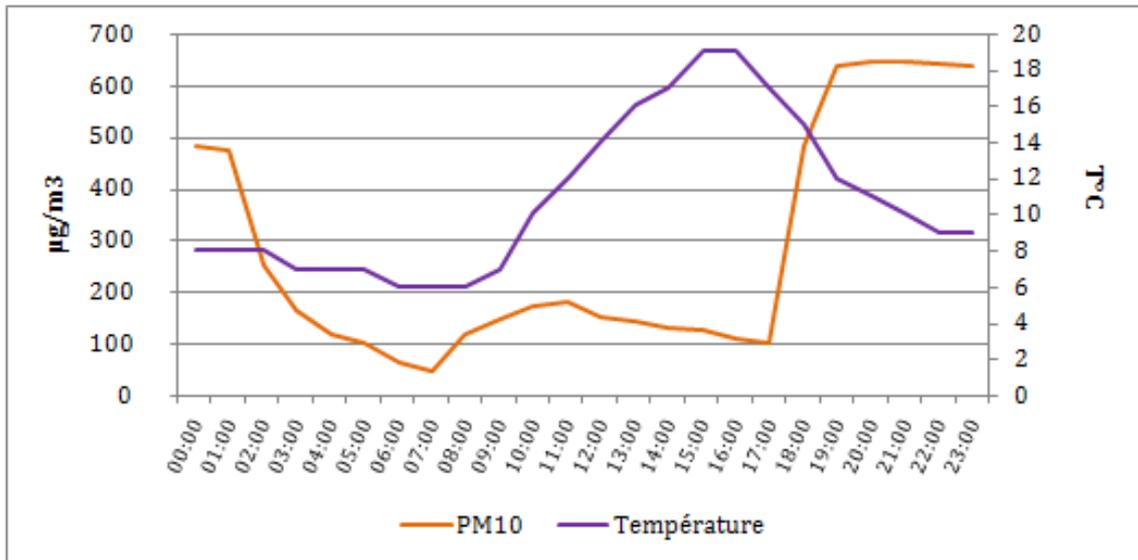


Figure 111 : Taux moyens horaires de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (ANPE) à la station de trafic routier de Beb Alioua, et des moyennes horaires de la température ambiante de l'air à la station de Tunis-Carthage le 14 janvier 2008 (Weather Underground).

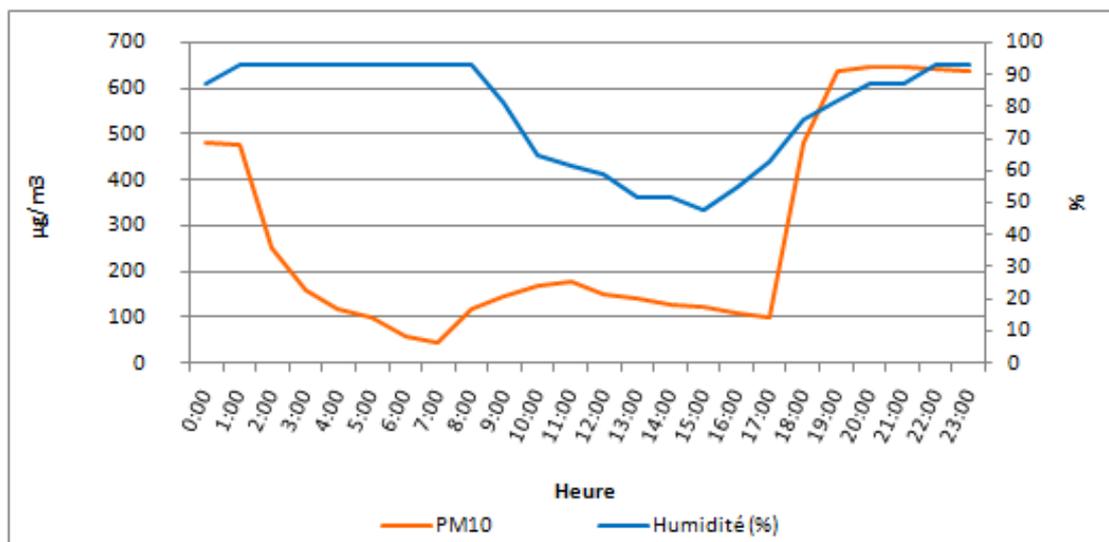


Figure 112 : Taux moyens horaires de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) le 14 janvier 2008 à la station de trafic routier de Beb Alioua (ANPE), et des moyennes horaires de l'humidité relative de l'air à la station de Tunis-Carthage. (Weather Underground).

Cet épisode de pollution est principalement produit pendant des jours de brise de mer de direction SSE le 14 janvier. Mais aussi à la suite de rejets industriels et du trafic automobile (Fig. 113).

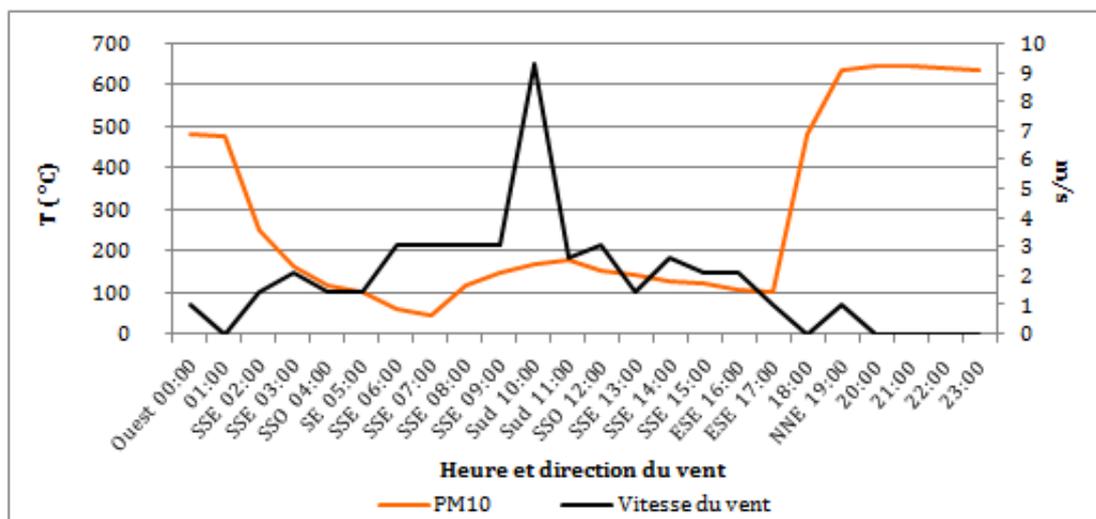


Figure 113 : Taux de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de trafic routier de Beb Alioua (ANPE), vitesse (m/s) et direction du vent à la station de Tunis-Carthage (INM) le 14 janvier 2008.

- Le 15 décembre 2006

En 2006, les particules en suspension ont atteint leurs maxima le vendredi 15 décembre en dépassant la norme tunisienne avec une valeur horaire moyenne de $316 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contre les $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ autorisés par la norme de 1994. Ce dépassement a été enregistré à la station de trafic routier de Beb Saadoun.

L'analyse des taux horaires de PM10 montre une forte concentration des particules la matinée, entre 8h et 11h. La température a été de 14°C (maximum : 20°C et minimum 9°C) (Fig. 114). Un temps humide avec une moyenne de 92 %.

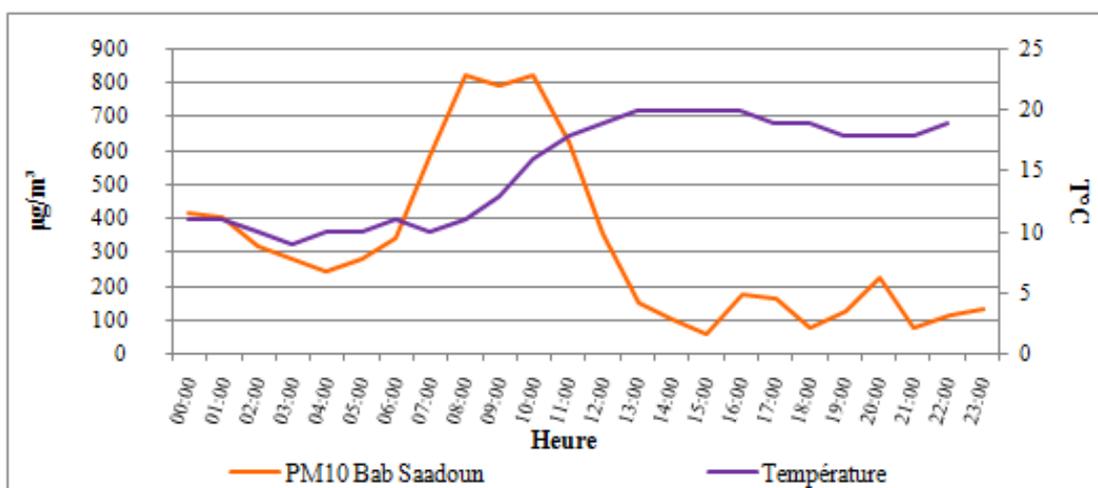


Figure 114 : Taux des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de trafic routier de Beb Saadoun (ANPE) et la température ambiante de l'air ($^\circ\text{C}$) à la station de Tunis-Carthage (INM) le 15 décembre 2006.

La vitesse moyenne horaire du vent mesurée à la station météo de Tunis-Carthage a été généralement faible le matin et s'élève à partir de 11h et enregistre un maximum de 6,2 m/s à 9h et 13h.

La rose des vents montre une nette domination des directions du secteur Est. Durant cette journée, nous avons enregistré 15 % des directions du vent ont été calme (Fig. 115).

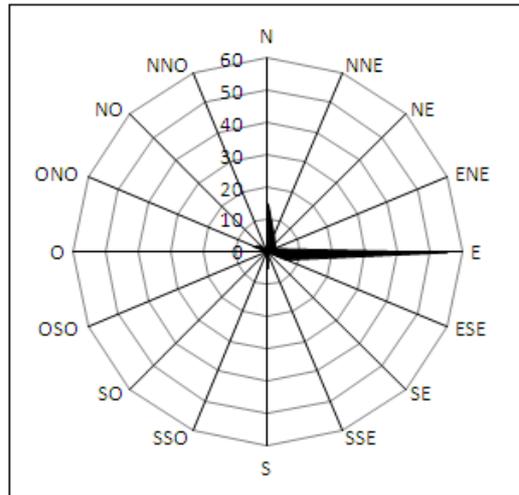


Figure 115 : Fréquence de la direction du vent le 15 décembre 2006 à la station de Tunis Carthage (*Weather Underground*).

Cet épisode de pollution particulaire est associé à l'échelle synoptique à une dorsale qui atteint son maximum sur la péninsule ibérique le 10 janvier avec une valeur de 1025 hPa et de 1026 hPa sur le désert libyen le 14 janvier (Fig. 116) : une forte stabilité atmosphérique qui a favorisé l'installation de puissantes brises littorales. Dans ces conditions, et par régime de brise de mer, le secteur de Beb Alioua reçoit d'importantes quantités de polluants des régions de fortes émissions (trafic automobile, industries, agglomération...) à l'est et au sud-est de la station.

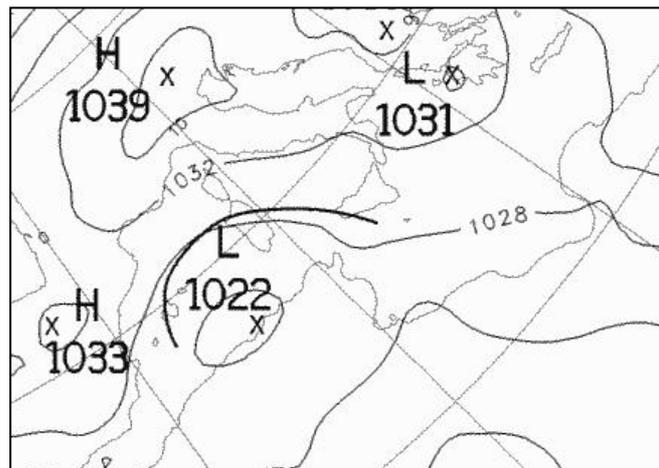


Figure 116 : Organisation des champs barométriques du 15 décembre 2006 à 00 h (TU) à 500 hPa. (Source : *wetterzentrale.de*).

VIII. 2. 2. 2. Dépassement à la suite d'une tempête de sable

La valeur moyenne journalière la plus élevée des PM10 de la période 2005-2010 a été enregistrée le mardi 03 février 2009 à la station de trafic routier de Beb Alioua avec un taux de 498 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cette journée hivernale se caractérisait par une température moyenne de 16°C, un maximum de 20°C à 13h et un minimum de 12 à 22h (Fig. 117).

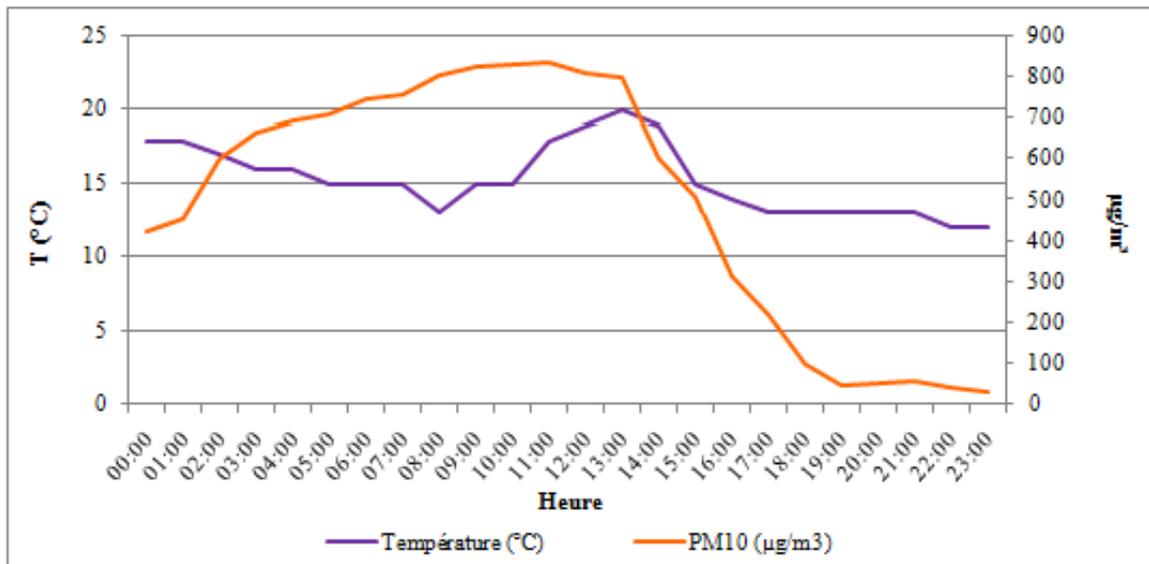


Figure 117 : Moyenne journalière de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de Beb Alioua (ANPE) et les moyennes journalières de la température à la station de Tunis-Carthage (*Weather Underground*) le 03 février 2009.

L'essentielle cause de l'augmentation spectaculaire du taux de PM10 a été le changement de secteur de vent entre le 2 et le 3 février. Le 2 février se caractérisait par un régime de vents de secteur SE avec une vitesse modérée (autour de 3 et 8,2 m/s). Pendant cette journée, les taux moyens horaires de PM10, à la station de Beb Alioua, ont été très faibles. A 20h, un changement de secteur de vent intervient, et devient de secteur Sud, provoquant une augmentation des niveaux en particules. Le lendemain, 3 février, la station a dépassé le seuil de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et a enregistré un taux journalier moyen de $498 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et la valeur horaire maximale de la journée a été exceptionnelle : $837 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à 11h. La vitesse du vent a été très faible ne dépassant pas 3,6 m/s. Ce vent du sud a été accompagné d'une tempête de sable selon l'INM, et se dissipait le 4 février avec le changement du secteur de vent qui devient de direction Ouest-sud-ouest ou Sud-sud-ouest (Fig. 118).

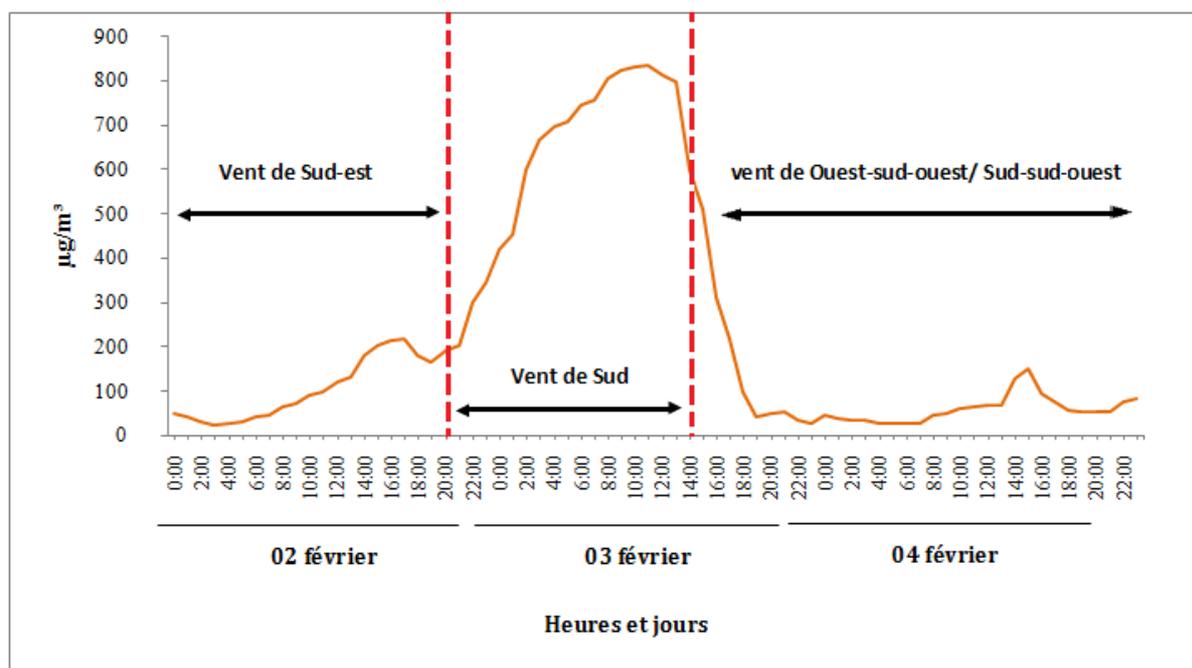


Figure 118 : Taux moyens horaires des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de Beb Alioua (ANPE), la vitesse et la direction et du vent à la station de Tunis-Carthage (*Weather Underground*) du 02 au 04 février 2009.

La situation atmosphérique de cette journée du 3 février 2009 a été dépressionnaire en surface (998 hPa à midi) avec la présence d'un front occlus sur la Tunisie et un temps instable (Fig. 119). Le temps était brumeux le matin et nuageux l'après-midi, avec des orages accompagnés de pluies fines (INM). Le dépassement du seuil de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ s'explique essentiellement par un vent de sable remontant du Sahara vers la Méditerranée parallèlement aux isobares dirigées sud/nord.

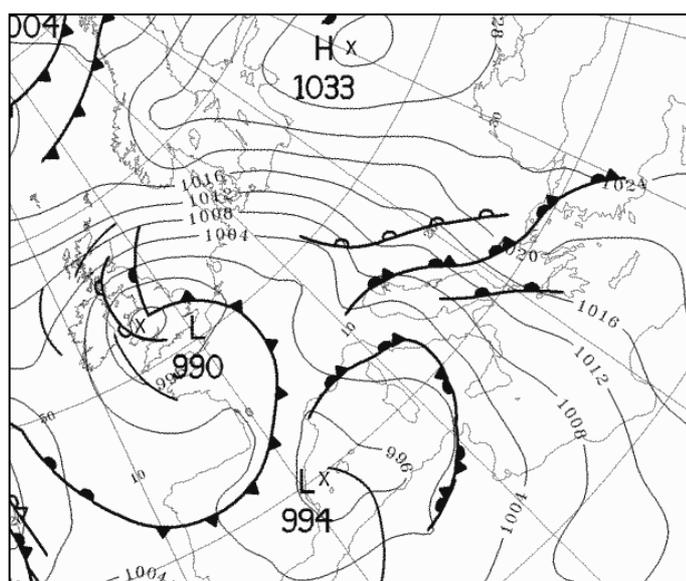


Figure 119 : Organisation du champ barométrique de surface le 03 février 2009 à 00 h (TU) (wetterzentrale.de).

En effet, le dépassement de la norme tunisienne relative aux PM10 a été dû essentiellement au vent de sable. Cette dernière a été la cause aussi de dépassement de plusieurs stations du RNSQA durant surtout les journées du 3, 6 et 7 février 2009 selon l'institut national de la météorologie (INM).

CONCLUSION

En somme, durant 7 ans (2005 et 2011) le seuil tunisien relatif aux PM10 fixé à 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (valeur-limite, moyenne journalière) a été dépassé 6 fois dans trois stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis (Beb Saadoun, Beb Alioua et Ben Arous). La valeur guide fixée à 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne journalière), a été fréquemment dépassée pendant toutes les années dans toutes les stations qui présentent des mesures de PM10 (Beb Saadoun, Ben Arous, Ghazela, La Manouba et Beb Alioua). Le seuil d'alerte a été déclenché deux fois dans le Grand-Tunis : en 2008 et 2010. En effet, les normes internationales fixées par l'OMS (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) n'ont été respectées que rarement.

L'épisode particulière enregistré en 2010 a été le plus long avec 2 jours successifs (28 et 29 août 2010). Tandis que le plus fort épisode a été de 238 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, enregistré en un seul jour : le 03 février 2009.

Les dépassements de la valeur-limite relative aux PM10 (260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, moyenne journalière) sont observés à proximité des sources d'émission des particules, notamment dans les deux stations de proximité du trafic routier (Beb Saadoun et Beb Alioua), de ce fait, les zones à proximité routières et d'émission des PM10 sont des zones à risque pour la population tunisoise.

Les situations atmosphériques à très haut risque pour la santé respiratoire sont essentiellement les situations estivales par temps chaud et sec avec des feux de végétations et les situations hivernales perturbées avec vent de sable ou anticycloniques propice à l'installation de puissantes brises littorales.

Les secteurs de Beb Saadoun et de Beb Alioua sont des secteurs à très haut risque de pollution aux PM10. Par régime de brise de mer, ils reçoivent d'importantes quantités de polluants du trafic automobile et des zones industrielles à l'Est et au SE des stations.

Conclusion de la deuxième partie

Les concentrations d'O₃ et des PM10 sont la conséquence de l'influence d'une multitude de facteurs, la localisation des de mesure de l'ANPE et les sources d'émission environnantes ainsi que les conditions météorologiques ambiantes (synoptique ou locale pour le cas des brises thermiques très difficile à quantifier ici en raison du manque de données mesurées et de l'absence de données modélisées).

Pour l'ozone, les conditions météorologiques nécessaires à une hausse de la concentration sont bien connues dans la littérature et démontrées dans les analyses de nos données : il s'agit de conditions anticycloniques caractérisées par des vents faibles et une stabilité dans la partie basse de la couche limite, les polluants sont piégés près du sol et ne peuvent alors se disperser et se diluer, donc les concentrations par unité de volume sont alors élevées. Ces facteurs dépendent des quantités et des types d'émissions de polluants primaires, nécessaires à la photolyse d'O₃.

Les épisodes photochimiques sont plus fréquents en été lorsque l'intensité du rayonnement UV est suffisante pour permettre aux réactions photochimiques d'avoir lieu.

Nous avons aussi pu constater la grande variabilité de ce polluant dans l'espace : les stations qui ont enregistré des dépassements de la valeur limite relative à l'O₃ (235 µg/m³) sont de type : urbain (La Manouba), périurbain (Parc Mourouj) et de proximité de zone industrielle (Ben Arous). La situation s'explique par le transport d'O₃ et de ses précurseurs des centres villes vers les périphéries.

Les processus météorologiques ainsi que les caractéristiques géographiques et topographiques ont influencé de manière importante les surconcentrations d'O₃ dans le Grand-Tunis. C'est le cas de La Manouba où Jbal Ammar rapproché bloque les masses d'air, causant ainsi des épisodes de pollution de l'air très importantes.

Pour les PM10, les teneurs les plus élevées et les dépassements des normes tunisiennes relatives à la santé (260 µg/m³, moyenne journalière) ont été relevés dans les stations de trafic routier, l'autoroute A1, les principales voies des zones d'activités et ceux de proximité d'une zone industrielle. Ce sont des zones à proximité des grands axes routiers, et les institutions industrielles. D'autres sources peuvent également injecter des PM10 dans l'air notamment les feux de végétation fréquents dans le Grand-Tunis surtout en été.

Les zones fortement polluées en O₃ et en PM10 constituent les points noirs, ce sont les zones critiques dans le Grand-Tunis qui méritent une attention particulière afin d'enrayer le phénomène.

L'inhalation de l'air contaminé par les polluants d'O₃ et de PM10 a des effets très délétères sur la santé respiratoire des tunisois.



Partie III

Santé respiratoire, situations atmosphériques à risque et impact de la pollution de l'air

Les événements météorologiques extrêmes et les surconcentrations de la pollution de l'air ont des répercussions dans la vie et la santé de l'Homme notamment sa santé respiratoire.

L'estimation des effets sur la santé du climat et de la pollution de l'air sera réalisée au moyen des indicateurs épidémiologiques manifestés par la morbidité et la mortalité par une pathologie respiratoire, enregistrées dans les services des urgences des établissements hospitaliers dans le Grand-Tunis.

Dans cette partie, nous avons cherché à exprimer les relations exposition/risque à court terme entre les paramètres climatiques ou les indicateurs de pollution et des indicateurs sur les admissions hospitalières.

Nous souhaitons évaluer l'impact du type de temps sur les admissions hospitalières pour morbidité ou mortalité de cause respiratoire. Peut-on parler d'un risque environnemental ? Pour cette raison nous avons exclu les pathologies respiratoires virales (grippe et tuberculose). Nous allons développer, à partir des différents indicateurs, quelles sont les valeurs-seuils environnementales (climat et pollution de l'air) qui entraînent une hausse significative d'admission hospitalière et de mortalité par pathologie respiratoire.

Chapitre IX : Mise en évidence d'un indicateur et de seuils prédictifs d'un impact sanitaire respiratoire

Dans ce chapitre, nous visons à définir les indicateurs susceptibles de quantifier l'impact sanitaire lié au climat et à la pollution atmosphérique particulaire et photochimique dans le Grand-Tunis.

Comment exprime-t-on les effets sanitaires du climat et de la pollution atmosphérique ? Pour répondre à cette question, nous devons passer par plusieurs étapes : définir et caractériser les situations de tension dans les services sanitaires ; identifier les jours et épisodes où les admissions dépassent les seuils et enfin, déterminer un seuil biométéorologique indiquant une admission hospitalière significative.

IX. 1. SITUATION DE TENSION DANS LES SERVICES SANITAIRES ET SEUILS CRITIQUES DES ADMISSIONS QUOTIDIENNES

Dans un premier temps, nous devons définir et caractériser les situations de tension dans les services sanitaires, puis repérer les pics quotidiens des admissions hospitalières.

IX. 1. 1. Caractérisation de la situation de tension dans un service sanitaire

Face à des événements et/ou des situations exceptionnelles (canicules, vagues de froid, épidémies, catastrophes naturelles...), les établissements hospitaliers, en particulier les services d'urgences, doivent être en mesure de recevoir des flux parfois très importants de victimes pour les traitements médicaux et chirurgicaux. Mais, à partir de quel seuil la situation devient-elle critique ?

Le service d'urgence est le meilleur site d'étude pour déterminer le seuil critique. En effet, le patient dispose d'un accès direct et libre aux services d'urgence des hôpitaux du service public, qui ouvrent généralement 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, et 365 jours par an. Il peut faire soigné sans prendre rendez-vous, ni frais d'avance.

Pour la caractérisation du « seuil critique » de l'effectif des admissions hospitalières, nous ne trouvons pas dans la littérature un chiffre bien précis pour définir un tel vocable. Et, même les interviews menés auprès des professionnels de santé, aucun d'entre eux n'a pu nous répondre, cependant ils parlent de « tension ».

Dans la situation de tension, la réflexion des autorités de santé distingue deux aspects, qui ne sont évidemment pas indépendants, mais qui appellent chacun des mesures spécifiques. Les tensions conjoncturelles, liées à un grave accident routier, à une épidémie... qui impliquent de faire face à un afflux massif de patients sans (trop) pénaliser les patients programmés. Et les tensions structurelles, chroniques, qui imposent de se pencher sur l'organisation non seulement du service d'urgences mais en fait de l'établissement tout entier et de l'offre de soins locale (Kadri *et al.*, 2014). En effet,

cette tension ne tient pas compte seulement du nombre de patients mais surtout entre la charge et la capacité (la capacité de soin ne peut plus supporter le flux de charge en soin).

IX. 1. 2. Seuils critiques ou pics des admissions hospitalières pour pathologie respiratoire

Face aux difficultés de définition des pics des admissions hospitalières et dans le souci de définir des seuils critiques définissant une situation sanitaire exceptionnelle, nous avons adopté une démarche statistique. La méthode consiste à analyser les centiles des séries des effectifs des patients recueillis dans les différents établissements de santé étudiés dans ce travail. Le 95^{ème} centile constitue la valeur la plus haute d'une série de données, ce qui peut être le seuil critique des admissions susceptible de créer des situations de tension dans un service hospitalier.

Si le seuil critique des admissions hospitalières a été dépassé plusieurs jours successifs, ces journées seront regroupées en un épisode unique. Deux épisodes sont séparés d'au moins une journée.

IX. 2. MATERIEL ET METHODE

Après l'identification des seuils critiques des admissions hospitalières, nous présentons les différents indicateurs environnementaux et les saisons climatiques.

IX. 2. 1. Les indicateurs de quantification des effets environnementaux sur la santé respiratoire

L'identification d'un indicateur biométéorologique et de seuils prédictifs d'un impact sanitaire sera réalisée au moyen d'indicateurs :

- les indicateurs de la morbidité respiratoire sont toutes les admissions hospitalières et les décès pour pathologies respiratoires aux services des urgences La Rabta et les urgences de Ben Arous.
- les indicateurs climatiques : les paramètres météorologiques qui ont un effet sur la santé respiratoire à savoir :
- les températures journalières minimales et maximales (en °C) ;
- l'humidité relative de l'air journalière maximale et minimale (en %) ;
- la vitesse journalière du vent maximale et minimale (en m/s).
- Les indicateurs d'exposition à la pollution atmosphérique : essentiellement les mesures d'O₃ et des PM₁₀ issues des stations de mesure de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis, qui présentent des mesures de ces polluants pendant la période d'étude considérée.

IX. 2. 2. Répartition des saisons climatiques

En se référant aux caractéristiques climatiques du Grand-Tunis dans le chapitre IV, deux saisons ponctuent l'année, l'une chaude et sèche, l'autre plus fraîche ; elles sont séparées par deux intersaisons plus brèves pendant lesquelles les extrêmes climatiques sont très rares ou absents.

Le mois de décembre marque le commencement de la saison froide dans le Grand-Tunis pour se poursuivre jusqu'au mois de mars. Avril et mai marquent la fin de la période de mauvais temps et les vagues de froid menacent rarement le Grand-Tunis. La saison chaude débute de juin jusqu'au septembre, les mois où peuvent survenir des épisodes de chaleur extrême. Quant aux mois d'octobre et de novembre, ils marquent la fin de la saison chaude et le début de la saison froide. De ce fait, la répartition des mois selon les saisons est comme suit :

- la saison froide : décembre, janvier, février et mars ;
- la saison chaude : juin, juillet, août et septembre ;
- l'intersaison : avril, mai, octobre et novembre.

IX. 2. 3. Les indicateurs de stress climatique

Puisque l'un des intérêts de cette étude est de déterminer le seuil absolu critique des variables météorologiques entraînant un surplus d'admissions jugées significatives du point de vue de santé publique, il est important de s'assurer que le seuil choisi reflètera bien cette relation. Pour cela, différentes valeurs sont testées, d'une façon systématique, pour s'assurer que les seuils identifiés sont optimaux. Et cela en reprenant la démarche suivie par l'Agence de développement de réseaux locaux de services de santé et de services sociaux de Montréal au Canada (Litvak *et al.*, 2005). Plus tard, en 2010, elle a été retenue par l'Institut de veille sanitaire en France (Laaidi *et al.*, 2009) et l'Institut national de santé publique du Québec (Martel *et al.*, 2010). Cette démarche est basée sur des indicateurs comme suit :

- **Indicateur 1** : (C1, C2) basé sur min et max, c'est-à-dire les minimales et maximales journalières des paramètres climatiques du jour de pic des admissions hospitalières ;
- **Indicateur 2** : (C1', C2') basé sur max2j et min2j, c'est-à-dire la moyenne des paramètres climatiques sur deux jours : j-1 et j ;
- **Indicateur 3** : (C1", C2") basé sur max3j et min3j, c'est-à-dire la moyenne des paramètres climatiques sur trois jours : j-2, j-1 et j.

Pour le choix du meilleur indicateur de stress climatique, nous devons suivre les étapes suivantes :

- 1- Extraire les admissions hospitalières par type de saison ;
 - 2 - Déterminer les seuils critiques des admissions hospitalières ;
 - 3 - Identifier les jours et épisodes où les admissions hospitalières dépassant le seuil critique, en indiquant la date, le nombre de cas hospitalisés, les valeurs minimales et maximales des variables météorologiques de la journée ;
 - 4 - Calculer la sensibilité et la spécificité de chaque indicateur. La sensibilité et la spécificité sont utilisées comme critère de comparaison. La sensibilité varie de façon discrète selon le nombre de journées à prédire. Au final un seul couple de valeurs-seuils est retenu celui qui présente la meilleure performance (forte spécificité et un faible nombre de fausses alertes). Ces deux indices se déterminent ainsi (Tab. 28) :
- spécificité : probabilité de ne pas prédire d'alerte lorsqu'il n'y en aura pas : $D / (B+D)$;
 - sensibilité : probabilité de prédire une alerte lorsqu'il y en aura une : $A / (A+C)$.

Tableau 28 : Représentation des variables pour le calcul de la sensibilité et la spécificité.
(Source : Martel et al., 2010)

	Historique = Alerte	Historique = Pas d'alerte
Prédiction = Alerte	Nombre de vraies alertes (vrai positif) A	Nombre de fausses alertes (faux positif) B
Prédiction = Pas d'alerte	Nombre d'alertes ratées (faux négatif) C	Nombre d'aucune alerte (vrai négatif) D

5- Explorer les différents indicateurs : il s'agit de choisir parmi les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). Par exemple, en utilisant un indicateur basé à la fois sur Tmax et Tmin, avec un critère de la forme $[(T_{max} > C1) \text{ et } (T_{min} > C2)]$, on fait varier les seuils C1 et C2 pour trouver le couple climatique (C1, C2) qui donne la meilleure sensibilité et spécificité prévisionnelle. En répétant ce processus pour les différents indicateurs considérés, on peut trouver celui qui donne la meilleure performance (Litvak *et al.*, 2005) ;

6- Déterminer les valeurs-seuils des indicateurs ;

7- Identifier l'indicateur le plus pertinent.

IX. 2. 4. Estimation de l'impact sanitaire de la pollution de l'air

La méthode appliquée pour étudier l'effet sanitaire de la pollution de l'air dans cette étude est celle utilisée dans le programme de surveillance épidémiologique dans 9 grandes villes françaises (PSAS-9) (Zeghnoun *et al.*, 2000) qui avait pour objectif d'estimer les relations entre l'exposition à la pollution atmosphérique urbaine et des indicateurs de l'état de santé de la population afin d'évaluer l'impact de la pollution sur la santé des habitants.

En effet, l'impact sanitaire est exprimé en nombre d'admissions hospitalières et de décès attribuables à la pollution atmosphérique.

Nous allons extraire et analyser les niveaux extrêmes des polluants problématiques : maximums horaires journaliers pour l'O₃ (en µg/m³), les moyennes journalières pour les PM10 (en µg/m³) et les mettre en relation avec les admissions hospitalières. De plus, trois scénarios sont étudiés afin de fournir des éléments pour la gestion du risque de la pollution de l'air :

- **Scénario 1** : Impact de la pollution de l'air dans le cas d'une pollution très faible (niveau de base = percentile 5) ;

- **Scénario 2** : Gain sanitaire attendu pour une réduction de 25 % du niveau moyen observé de la pollution ;

- **Scénario 3** : Gain sanitaire attendu pour une réduction des niveaux de pollution telle que les jours correspondant à un niveau supérieur ou égal au percentile 75 soient ramenés au percentile 25.

Les résultats permettent également de fixer des objectifs de qualité de l'air fondés sur des critères de santé publique, notamment dans l'établissement des normes réalistes de la qualité de l'air et des valeurs guides en Tunisie. Nous allons proposer un risque applicable au Grand-Tunis et à toute ville tunisienne.

CONCLUSION

Notre méthodologie d'approche utilisée dans la présente étude pour estimer les effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé est basée sur les indicateurs environnementaux. Pour le climat, il s'agit de définir les valeurs-seuils ou seuils biométéorologiques identifiant un surplus des hospitalisations. Et cela à partir des extrêmes des paramètres météorologiques qui ont le plus grand effet sur la santé respiratoire, qui sont :

- les températures journalières minimales et maximales (en °C) ;
- l'humidité relative de l'air journalière maximale et minimale (en %) ;
- la vitesse journalière du vent maximale et minimale (en m/s).

Pour la qualité de l'air, il s'agit d'analyser les relations entre les admissions hospitalières et les niveaux extrêmes journaliers de l'O₃ (en µg/m³) et des PM10 (en µg/m³). Nous présentons aussi, trois scénarios afin de fournir des éléments pour la gestion du risque de la pollution de l'air.

En effet, nous allons définir les seuils biométéorologiques à partir des admissions aux urgences. Au premier lieu, définir les seuils biométéorologiques de toutes les pathologies respiratoires tous types confondus à partir des données cliniques des hospitalisations aux urgences La Rabta. En deuxième lieu, nous définissons des seuils plus fins spécifiques à l'asthme, une pathologie très sensible aux facteurs environnementaux.

Chapitre X : Les consultations externes à la Rabta : variabilité des pathologies respiratoires et impact du climat

Dans ce chapitre, nous allons caractériser la variabilité saisonnière des consultations pour pathologies respiratoires tous types confondus selon le nombre et les types. Nous allons aussi étudier la variabilité des consultations selon les conditions météorologiques extrêmes et la pollution de l'air.

X. 1. VARIABILITE TEMPORELLE DES CONSULTATIONS EXTERNES A L'HOPITALA RABTA

X. 1. 1. Présentation de la population étudiée

Une étude rétrospective a été menée dans les archives du service de pneumologie du centre hospitalo-universitaire La Rabta à Tunis entre 2005 et 2010. Durant cette période, 16 162 patients ont été enregistrés en consultation externe pour maladie de l'appareil respiratoire. Après l'échantillonnage probabiliste systématique, nous avons retenu 15 % des fiches des patients, soit 2425 fiches, ce nombre est considéré comme généralisable à l'ensemble des patients.

Le nombre de consultations comptabilisé ne correspond pas au nombre de patients, certains d'entre eux pouvant être admis plusieurs fois pour la même pathologie au cours de la période d'étude. De ce fait, le dénombrement des patients ne prend pas en compte les rendez-vous, chaque visite étant donc une nouvelle consultation.

Le nombre et la distribution des patients qui ont visité au moins une fois les consultations externes du service de pneumologie La Rabta entre 2005 et 2010, montre dans l'ensemble, une égalité des consultations entre les femmes et les hommes avec respectivement 51 % et 49 %. La collecte d'échantillon des données montre la diversité des maladies respiratoires en nombre et en type. En effet, nous avons recensé, pendant les six ans d'étude (de 2006 à 2010), 17 pathologies respiratoires incluant le cancer pulmonaire ainsi qu'une forte présence des symptômes cliniques. Ces derniers indiquent la courte durée de l'exposition des patients aux facteurs aggravants qui ont nécessité une consultation.

Le nombre quotidien de consultants dépend des horaires et jours d'ouverture et du système de rendez-vous que l'hôpital La Rabta utilise. Comment ces consultations varient-elles à l'échelle annuelle et à l'échelle mensuelle ? Autrement dit, est-ce qu'il y a des maladies « météo-sensibles » qui apparaissent en un mois ou une saison et disparaissent en une autre ?

X. 1. 2. Prédominance inter-saisonnière des consultations externes

Si nous prenons le nombre total des patients sans l'échantillonnage : à l'échelle annuelle, l'année 2005 a été exceptionnelle et a accueilli le plus grand nombre de malades avec

3051 patients, ce qui représente un excédent de 130 % par rapport à la moyenne de la période, suivi par l'année 2010 (2716 patients), 2006 (2631 patients), 2007 (2599 patients), 2009 (2369 patients) et enfin 2008 (2346 patients) (Fig. 120).

La relation entre le nombre de jours froids et nombre de consultations enregistré dans le service de consultation externe La Rabta montre que l'année 2005 qui a accueilli le plus grand nombre de patients a été relativement plus froide que les restes des années, avec le plus grand nombre de jours froids.

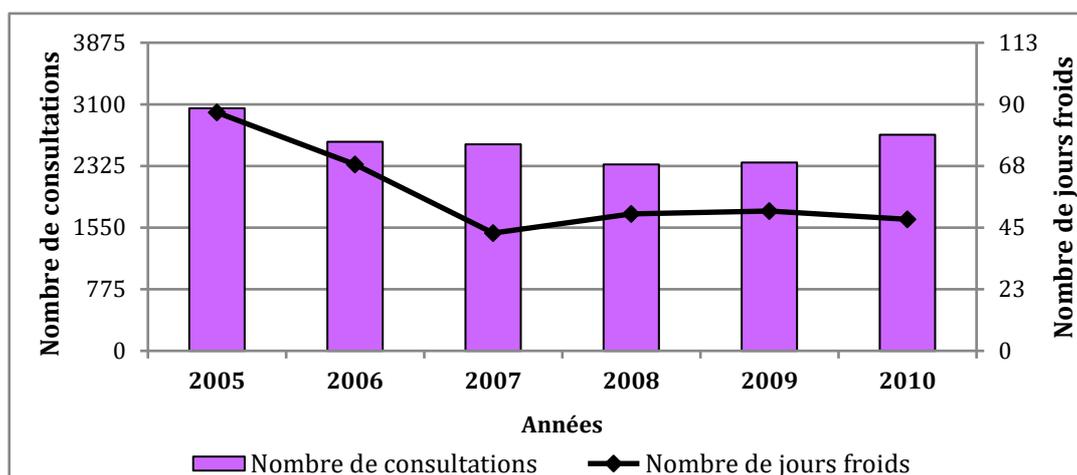


Figure 120 : Nombre total de patients enregistré au service de consultation externe La Rabta et nombre de jours froids par an entre 2005 et 2010. (Source de données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).

Le nombre de patients résultant de l'échantillonnage (15 %) montre sur le plan saisonnier, pour toutes les années, une prédominance des troubles respiratoires durant la période inter saisonnière (le printemps 31 % et l'automne, 27 %) et une plus faible part en été suivie d'une baisse hivernale (24 %) et surtout estivale (17 %) (Fig. 121).

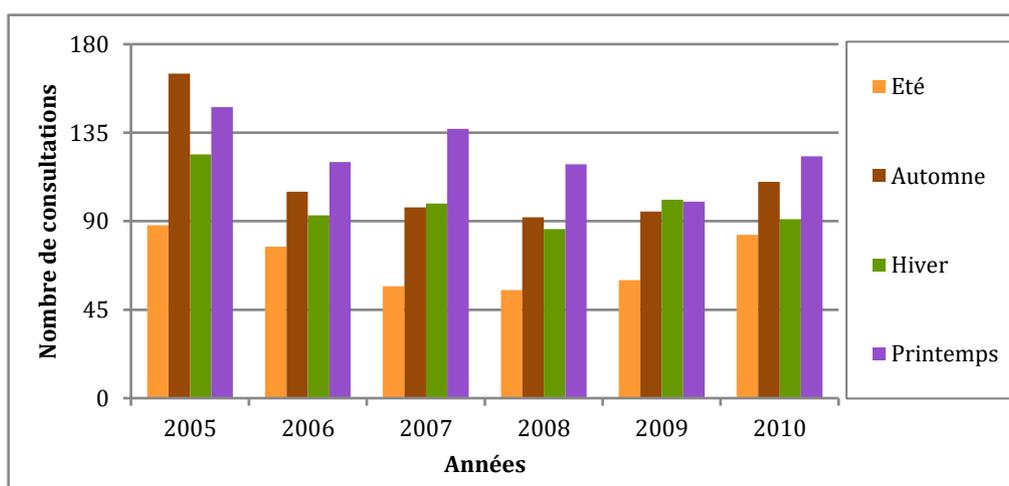


Figure 121 : Cumul de consultations par saison à l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. (Source de données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).

La recrudescence des consultants pour pathologie respiratoire pendant le printemps et l'automne est due à la forte présence des allergènes qui favorisent les pics allergiques : le printemps pour les pollens et l'automne pour les acariens. Les acariens se développent toute l'année dans les habitations et plus intensément en automne mais aussi en hiver, lorsque le temps est plus fréquemment humide et que les logements sont chauffés et moins aérés. Quant aux pollens ils sont fréquents notamment au printemps lors de la floraison, mais aussi à l'automne pour les pollens des herbacées.

A l'échelle mensuelle, le plus grand nombre des consultations pour l'année 2005 a été enregistré au mois de novembre, en 2006 et 2008 au mois de mars, en 2007, au mois de mai, en 2009 au mois de janvier et en 2010 au mois d'avril. Si les maximales des consultations externes sont variables d'un mois à un autre, les minimales pour toutes les années sont durant les mois de juillet et d'août (Fig. 122).

Durant toute la période d'étude 2005-2010, le mois d'avril détient le plus grand nombre de patients (260) soit 11 % du total des patients toutes pathologies confondues. Suivi par le mois de mai (255 patients), de mars (233 patients) et les plus faibles pour les mois de juillet (124 patients) et d'août % (75 patients).

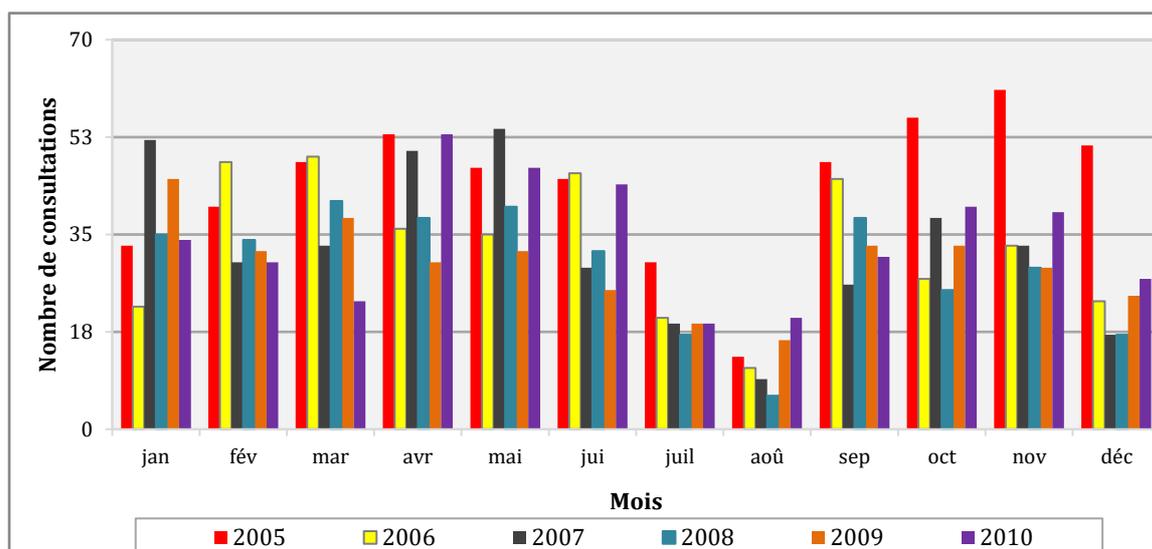


Figure 122 : Variabilité mensuelle du nombre total de consultations externes à l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. (Source de données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).

Les consultations journalières dans le service de pneumologie de La Rabta, toutes maladies confondues, sont plus fréquentes durant les intersaisons. Durant les mois la fréquence est variable d'un mois à un autre.

Est-ce que cette variabilité saisonnière et mensuelle est respectée par type de pathologie ?

X. 1. 3. La variabilité temporelle des consultations par type de pathologie

L'analyse du tableau 29 et des figures 123, laisse apparaitre que :

- toutes les pathologies respiratoires sont présentes au cours de l'année, ce qui montre qu'il n'y a pas une maladie météo-sensible très marquée par les saisons ;
- en hiver, les consultations pour pneumopathie, pleurésie et pneumonie sont les plus fréquentes. Elles représentent respectivement 35 %, 32 % et 38 % des consultations durant la période d'étude (2005-2010) ;
- l'allergie, la BPCO, la bronchite (qui englobe tous les types de bronchites, aiguës ou chronique), la DDB, la dyspnée, l'hémoptysie, le cancer pulmonaire et la silicose sont plus présents au printemps. Ils représentent respectivement, 33 %, 33 %, 35 %, 36 %, 31 %, 34 %, 33 % et 67 % du total des consultations de chaque pathologie durant la période d'étude ;
- les consultations pour l'asthme, la rhinite, la toux et l'embolie pulmonaire sont plus fréquentes en automne, avec respectivement, 31 %, 32 %, 31 % et 35 % du total des consultations de la pathologie durant la période d'étude ;
- la recrudescence du pneumothorax est plus forte au printemps, saison pendant laquelle la variation de la pression atmosphérique est la plus fréquente. Cette pathologie est très sensible à la pression atmosphérique notamment l'exposition à une variation inhabituelle de la pression atmosphérique.

Tableau 29 : Fréquences saisonnières des pathologies respiratoires dans le service des consultations externes à l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. (Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).

Type de pathologie	Hiver (%)	Printemps (%)	Eté (%)	Automne (%)
Asthme	23	30	16	31
Allergie	25	33	19	23
BPCO	27	33	14	26
Bronchite	28	35	13	23
DDB	31	36	17	16
Douleur thoracique	15	27	29	31
Dyspnée	19	31	21	29
Hémoptysie	27	34	15	24
Pneumopathie	35	28	16	21
Rhinite	28	25	15	32
Toux	24	27	18	31
Pleurésie	32	29	18	21
Pneumonie	38	16	22	24
Embolie pulmonaire	24	29	12	35
Cancer	20	33	27	20
pneumothorax	7	36	7	50
Silicose	0	67	0	33

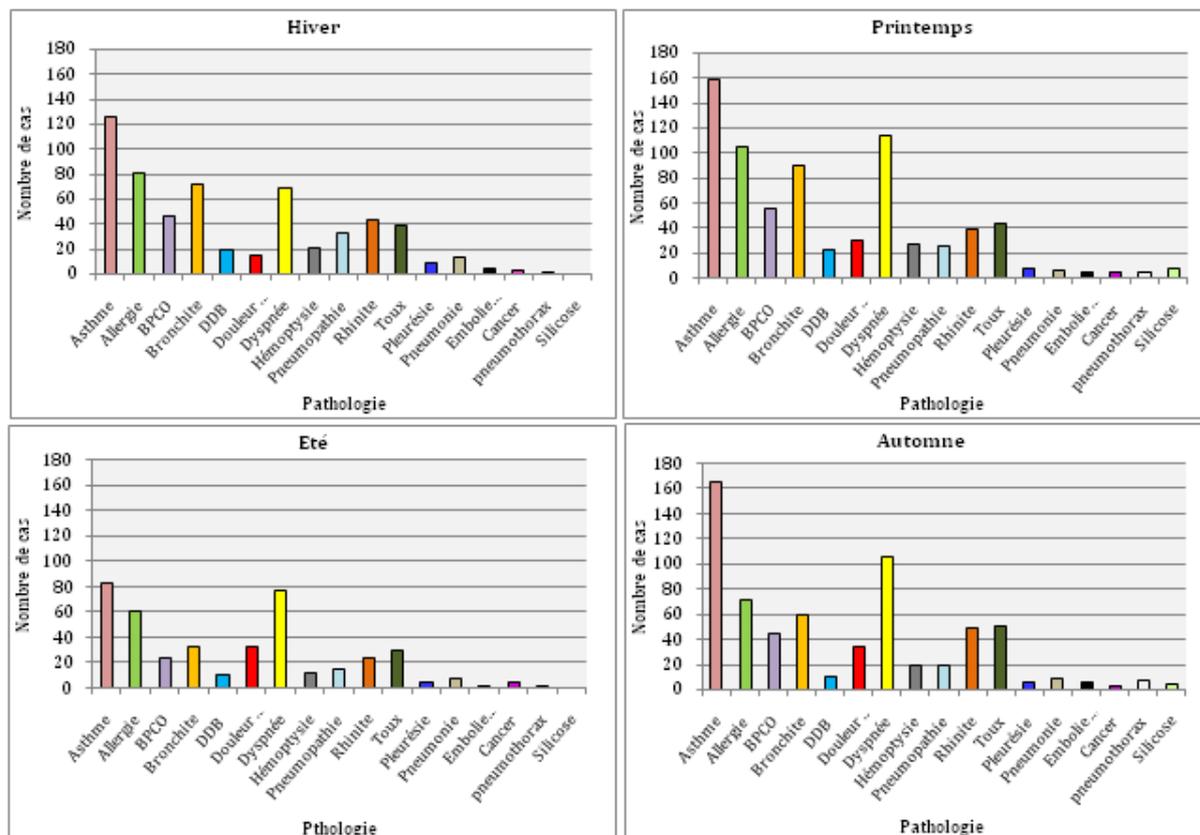


Figure 123 : Répartition saisonnière des pathologies respiratoires dans le service des consultations externes à l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. (Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).

X. 1. 4. Prédominance des jours à faible taux de consultations

Après échantillonnage, le nombre total de visites aux consultations externes à l'hôpital La Rabta est 2425. Le nombre de consultations a varié entre 0 et 9 (sans compter les samedis et les dimanches), donc, avec une moyenne de 1,6 consultation par jour. Le tableau suivant (Tab. 30) classe les jours selon le nombre de consultations.

Tableau 30 : Nombres de consultations quotidiennes aux consultations externes à l'hôpital La Rabta de la période 2005-2011. (Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).

Nombre de Consultations par jour	0*	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2005	67	54	48	31	36	17	5	2	0	1
2006	81	48	60	27	17	12	3	0	0	0
2007	95	52	52	34	12	12	4	0	0	0
2008	81	67	67	38	8	1	0	0	0	0
2009	79	73	64	32	8	3	2	0	0	0
2010	80	67	48	35	20	7	4	0	0	0
Total	483	361	473	197	101	52	18	2	0	1

0* : sans les samedis et les dimanches

Plus le nombre de consultations est faible, plus le nombre de jours est élevé. En effet, les jours à zéro consultation prédominent pour toutes les années, ils représentent 31 % du total des jours de consultations, soit 483 jours. Suivies par les jours à une seule ou deux consultations qui représentent respectivement 23 % et 22 %. Les jours avec un nombre élevé de malades sont rares et représentent des fréquences négligeables (2 jours à 7 consultations et un à 9). Ces jours sont concentrés en une seule année : 2005 (Fig. 124).

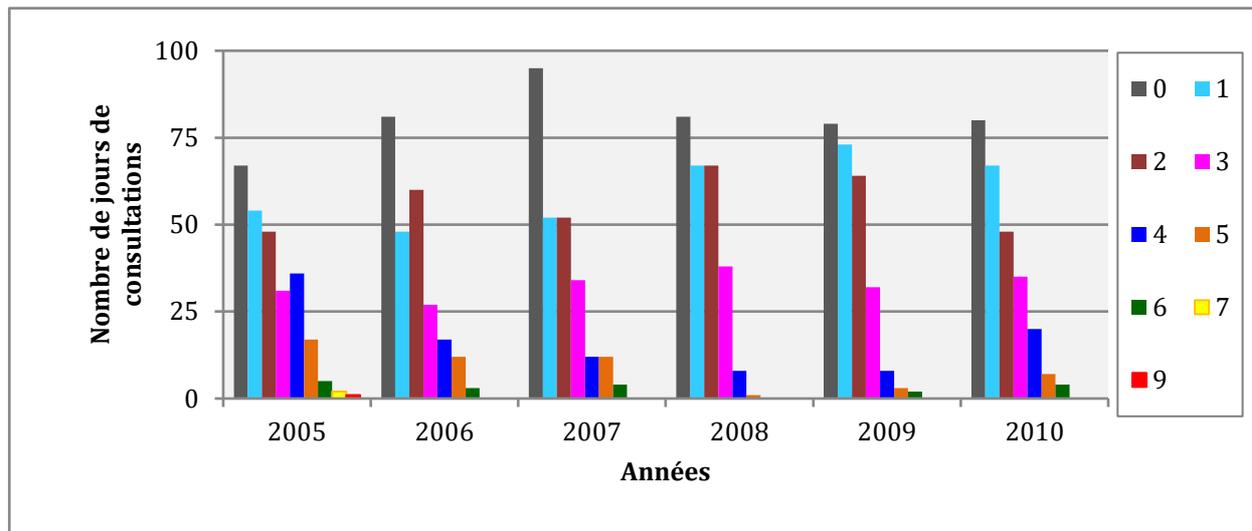


Figure 124 : Nombre de jours selon le nombre de consultations aux consultations externes à l'hôpital La Rabta de la période 2005-2011. (Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).

X. 2. VARIABILITE DES CONSULTATIONS SELON LES CONDITIONS CLIMATIQUES EXTREMES ET LA POLLUTION DE L'AIR

X. 2. 1. Conditions climatiques extrêmes et impact sur les consultations externes

Pendant la période du 2005-2010, la fréquence des jours paroxysmiques froids et très froids est très faible par rapport aux jours de forte chaleur et torrides. Nous comptons 21 jours froids et très froids contre 682 jours chauds et très chauds (Chapitre IV). Le nombre de consultations -après l'échantillonnage- pendant la saison froide (novembre-avril) est élevé, notamment pendant les mois de janvier (221 patients), mars (232 patients) et novembre (224 patients). Il atteint son maximum pendant les mois d'avril (260 patients) et mai (255 patients), avec le début de la période chaude qui coïncide avec la saison pollinique. Les consultations décroissent à partir du mois de juin (221 patients) et enregistrent leurs plus bas nombres au mois d'août (75 patients) (Fig. 125).

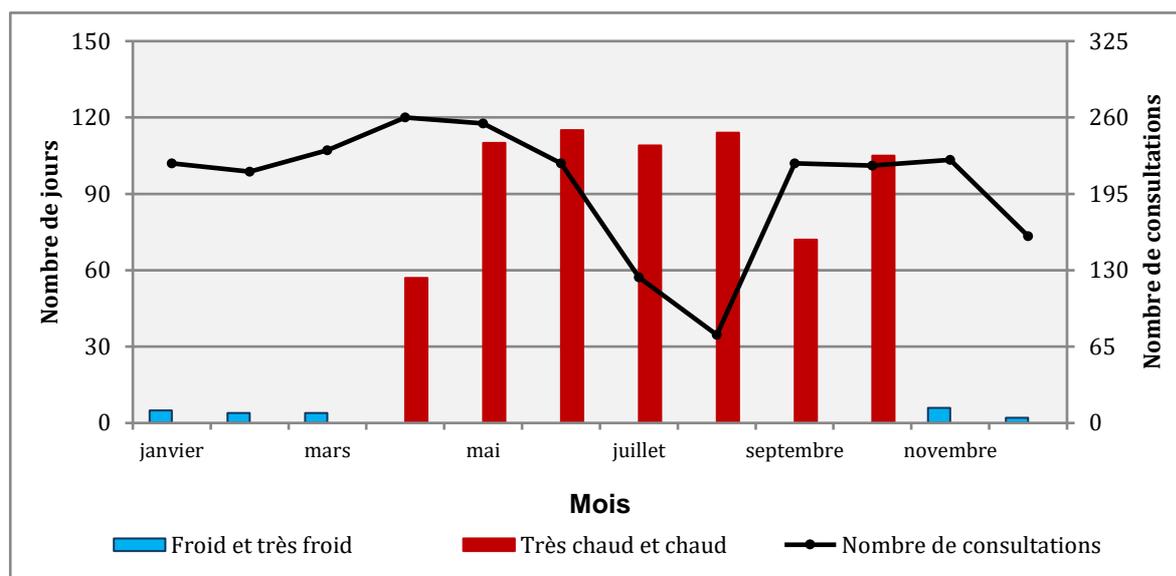


Figure 125 : Nombre de patients, dans les consultations externes à l'hôpital La Rabta et nombre de jours paroxysmiques froids et très froids ou chauds et très chauds entre 2005 et 2010. (Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta et INM).

La vague de froid la plus longue de l'année, qui a duré 14 jours consécutifs (du 24 janvier au 06 février 2005) et qui a connu aussi les seuls jours paroxysmiques « froids » de toute la période d'étude a enregistré 17 consultations. Pendant cette période, le plus grand nombre de consultations a été au nombre de 5 (le 4 février 2005) survenu après 11 jours paroxysmiques.

Les consultations des jours paroxysmiques frais et ceux aussi précédés par des jours paroxysmiques sont caractérisés par des pathologies très sensibles au froid, notamment l'asthme qui représente 33 % des consultations, la rhinite allergique et l'allergie ensemble représentent aussi 33 %.

X. 2. 2. Maximums journaliers d'O₃ et les consultations externes à La Rabta

En 2005, seule la station du Parc Mourouj a enregistré des dépassements de la valeur limite relative à l'O₃ (235 µg/m³) et cela pendant les mois de juin, juillet et août (Fig. 126).

La surconcentration d'O₃ du jeudi 30 juin (257 µg/m³) a été suivie d'un pic de consultations à l'hôpital La Rabta, le vendredi 1^{er} juillet, de 5 consultations et le lundi 4 juillet de 4 consultations. Les visites ont été essentiellement pour dyspnées (3 cas), asthme (2 cas), toux (2 cas) et allergie (2 cas).

Les dépassements des normes tunisiennes relatives à l'O₃ du vendredi 29 juillet (255 µg/m³), du samedi 30 juillet (249 µg/m³) et du mardi 2 août 2005 (239 µg/m³) ont été suivis de 7 consultations réparties sur 6 jours. Les consultations ont été essentiellement pour allergie respiratoire (2 cas) et asthme (2 cas). La pollution photochimique a altéré la fonction respiratoire de ces patients et a aggravé les symptômes respiratoires.

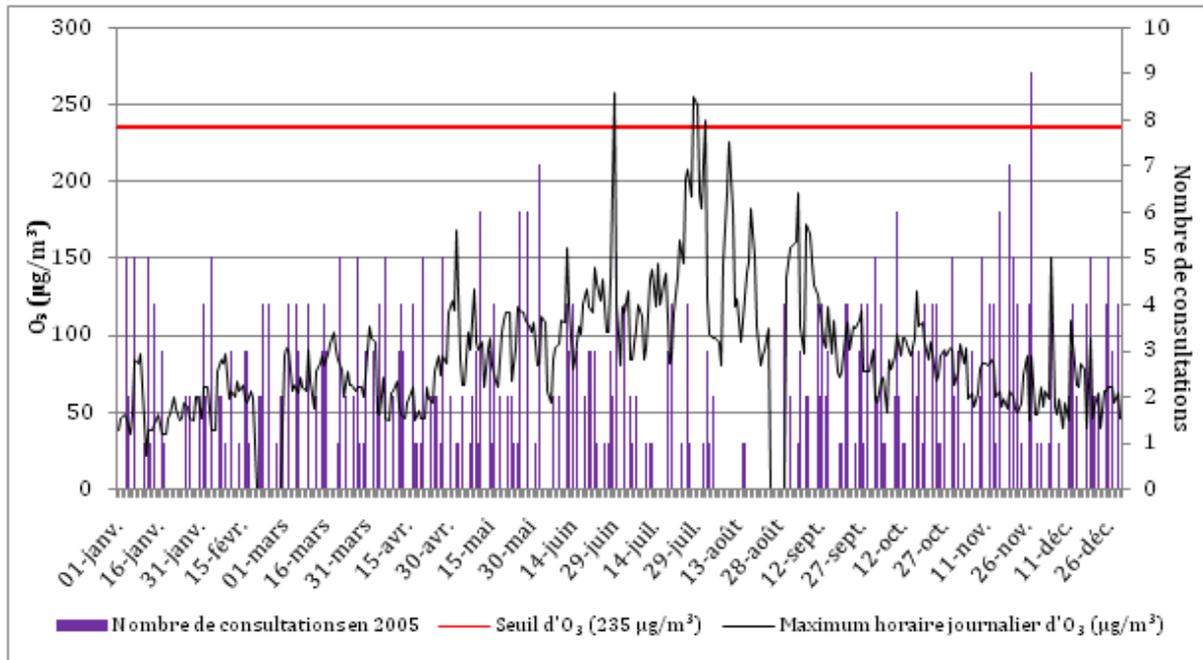


Figure 126 : Maximum horaire journalier d'O₃ (µg/m³) à la station Parc Mourouj (ANPE) et le nombre de consultations à l'hôpital La Rabta (*service de pneumologie de l'hôpital La Rabta*) en 2005.

CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'avoir une vision globale sur la variabilité des pathologies respiratoires à partir d'un échantillon de 2425 patients ayant consulté au service des consultations externes de l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. Au total, nous comptons 17 pathologies respiratoires.

L'analyse des données cliniques montre que :

- à l'échelle annuelle, l'année 2005 a accueilli le plus grand nombre de malades avec 3051 patients, représentant un excédent de 130 % par rapport à la moyenne de la période ;
- à l'échelle saisonnière, la période inter saisonnière, printemps et automne se démarquent, avec respectivement 31 % et 27 % du total des consultations, tandis que l'été présente le plus faible nombre de consultations avec 17 % ;
- la présence des différents types de pathologies respiratoires au cours de l'année, donc il n'existe pas des maladies respiratoires météo-sensibles très marquées par les saisons ;
- les jours paroxysmiques thermiques n'ont pas une grande influence sur la répartition mensuelle des consultations à la Rabta, néanmoins, suite à une mauvaise qualité de l'air on peut avoir des pics de consultations, notamment chez les asthmatiques et les allergiques.

Le nombre quotidien de patients au service de consultation de La Rabta dépend des horaires et jours d'ouverture et du système de rendez-vous que l'hôpital La Rabta utilise. Les données relatives à ces consultations externes ne fournissent pas les renseignements nécessaires sur la date des pics des troubles respiratoires liés aux paroxysmes météorologiques ni même ceux de la pollution atmosphérique à cause du

nombre excessif de malades. Ceux-ci peuvent attendre plusieurs semaines pour obtenir un rendez-vous auprès du médecin. De ce fait, les données de consultations externes nous ont permis juste d'étudier les différents types de pathologies respiratoires et le nombre des patients et les mettre en relation avec les caractéristiques météorologiques mais pas avec les types de temps des jours des pics des consultations comme sera le cas avec les données cliniques des urgences de La Rabta et Ben Arous.

Chapitre XI : Les effets des conditions climatiques et des polluants atmosphériques sur les admissions hospitalières aux urgences La Rabta

Le patient peut avoir des situations sanitaires difficiles à maîtriser à domicile ou au lieu du travail. Et, face à des symptômes persistants, difficiles à soulager ou à équilibrer, le recours aux urgences devient nécessaire. La situation critique du patient et la gravité de la maladie, sont généralement les conditions d'admission du patient par le service des urgences. L'admission du patient peut être directe lorsque l'état du malade impose sans délai des soins spécialisés (réanimation) ou si un lit est libre dans un service adapté à son état. En l'absence de disponibilités de lits sur le site ou de la spécialité dont dépend le patient, celui-ci devra être transféré dans un hôpital externe. En fonction de son état, le patient peut, après traitement, rentrer chez lui, être transféré à d'autres services spécialisés et dans les pires des cas, il décède.

Une étude rétrospective consacrée aux patients hospitalisés pour une maladie de l'appareil respiratoire a été menée dans le service des urgences du centre hospitalo-universitaire la Rabta en 2009. Cette étude est centrée sur les pathologies en lien avec l'environnement et la pollution atmosphérique. Les hospitalisations ont été décrites en fonction du type de pathologie, de l'âge et du genre, ce qui va nous permettre de connaître l'âge moyen des malades hospitalisés ou la tranche la plus sensible, la part des différentes maladies respiratoires et la part des différents facteurs dans le déclenchement des maladies respiratoires en l'occurrence ici les éléments climatiques et la pollution atmosphérique.

Les facteurs de risque individuels tels que le taux de cholestérol, l'obésité, la sédentarité, le tabagisme, l'alcoolisme, l'hypertension artérielle, l'atopie qui peuvent être impliqués dans les différentes pathologies respiratoires (Pascal *et al.*, 2011) ne peuvent pas être pris en compte dans notre étude puisque c'est rare de les trouver notés dans le registre de collecte des données.

Ce chapitre s'est attaché donc à déterminer si un excès d'hospitalisation pouvait être identifié pour les pathologies respiratoires dans les urgences La Rabta lors des fortes pollutions atmosphériques ou lors des conditions atmosphériques typiques. Nous allons chercher aussi les indicateurs biométéorologiques et de la qualité de l'air identifiant le seuil critique de surplus des hospitalisations.

XI. 1. DESCRIPTION DES ADMISSIONS HOSPITALIERES SELON LA PATHOLOGIE ET L'AGE

Au service des urgences La Rabta, 408 patients ont été hospitalisés pour cause de maladie de l'appareil respiratoire, entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre 2009. Le service des urgences a reçu donc en moyenne une nouvelle admission par jour.

XI. 1. 1. Une dominance masculine augmentant avec l'âge

Les séjours aux urgences de La Rabta, sont globalement plus fréquents chez les hommes. Le genre masculin intervient dans 64 % des cas contre 36 % du genre féminin.

L'âge moyen des patients est de 58 ans avec des extrêmes allant de 17 à 95 ans. L'âge moyen chez les femmes et chez les hommes est très proche avec respectivement 58 et 57 ans. 57 % de ces séjours ont été effectués par des personnes de moins de 65 ans et cette proportion variant très fortement selon le type de la pathologie respiratoire.

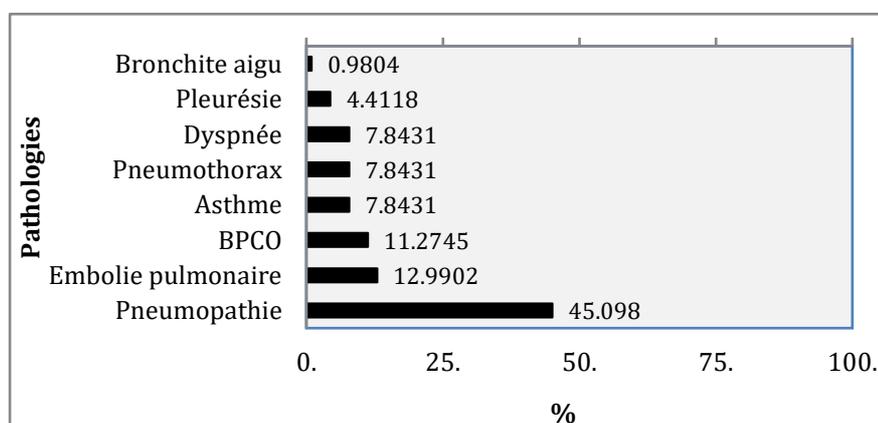
La prévalence relative des hospitalisations augmente avec l'âge chez les deux genres. Pour le groupe d'âge des moins de 45 ans, elle est de 23 %, et de 34 % pour le groupe d'âge entre 45 et 64 ans, et de 43 % pour ceux qui dépassent les 65 ans. Nous remarquons aussi que dans toutes les catégories d'âges, le taux des visites aux urgences est plus élevé chez les hommes que chez les femmes (Tableau 31).

Tableau 31 : Nombre de personnes ayant consulté pour une pathologie respiratoire aux urgences La Rabta selon le groupe d'âge, en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).

	Groupe d'âge			
	0-44	45-64	65 et plus	Total
	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre
Femmes	33	49	66	148
Hommes	62	89	109	260
Total	95	138	175	408
%	23	34	43	100

Treize types de pathologies respiratoires et de symptômes cliniques ont été recensés. La figure 126, représente le pourcentage de chaque pathologie par rapport au total. Les pathologies représentant moins de 1 % (l'emphysème, la fibrose pulmonaire, l'insuffisance respiratoire, la détresse respiratoire et le cancer) ne sont pas représentées dans le graphique. La pneumopathie est la pathologie la plus présente aux urgences La Rabta, elle se classe première avec 45,1% bien loin des autres pathologies : embolie pulmonaire (13 %), BPCO (11,3 %), asthme (7,8 %), pneumothorax (7,8 %), dyspnée (7,8 %), pleurésie (4,4 %) et bronchite aiguë (1 %) (Fig. 127).

Figure 127 : Pourcentages des différents types de pathologies respiratoires aux urgences La Rabta en 2009.



Les hommes prédominent sur la majorité des pathologies à l'exception de l'embolie pulmonaire où les femmes sont presque égales au nombre de leurs homologues masculins. Les hospitalisations pour la fibrose pulmonaire, la détresse respiratoire et l'épanchement pleural concernent plutôt les femmes (Tab. 32).

Tableau 32 : Répartition des pathologies selon le genre des patients hospitalisés aux urgences La Rabta en 2009. (Source des données: archives des urgences La Rabta).

Pathologies	Nombre		Total
	Femmes	Hommes	
Asthme	13	19	32
Pneumopathie	68	116	184
BPCO	7	39	46
Pneumothorax	5	27	32
Pleurésie	11	7	18
Emphysème	0	1	1
Dyspnée	14	18	32
Bronchite aigu	1	3	4
Embolie pulmonaire	26	27	53
Fibrose pulmonaire	1	0	1
Cancer broncho-pulmonaire	0	1	1
Détresse respiratoire	2	0	2
Insuffisance respiratoire aiguë	0	2	2
Total	148	260	408

Les patients âgés de 65 ans et plus sont les plus touchés par la pneumopathie, la BPCO et la dyspnée. En effet, les dyspnées aiguës sont un des motifs les plus fréquents d'hospitalisation des sujets âgés et posent des problèmes diagnostiques et thérapeutiques. De plus, pour la pneumopathie, notamment la pneumopathie bactérienne, est la maladie infectieuse la plus fréquente chez les sujets de plus de 65 ans (L'Her *et al.*, 2003). Les patients entre 45 et 64 ans sont plus touchés par la pleurésie pulmonaire avec 41 % du total des patients atteints par cette maladie. Quant aux plus jeunes (moins de 44 ans), ils sont majoritairement hospitalisés pour asthme et pneumothorax (Tab. 33).

Tableau 33 : Nombre et pourcentage des pathologies respiratoires selon la tranche d'âge aux urgences La Rabta en 2009. (Source des données : archive des urgences La Rabta).

Pathologies	0-44		45-64		65 ans et plus	
	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
Asthme	16	50	14	44	2	6
Pneumopathie	41	22	50	27	93	51
BPCO	4	9	14	30	28	61
Pneumothorax	18	56	10	31	4	13
Pleurésie	3	18	9	47	6	35
Emphysème	0	0	1	100	0	0
Dyspnée	7	22	12	38	13	41
Bronchite aigu	2	50	0	0	2	50
Embolie pulmonaire	4	8	26	49	23	43
Fibrose pulmonaire	0	0	0	0	1	100
Cancer pulmonaire	0	0	1	100	0	0
Détresse respiratoire	0	0	0	0	2	100
Insuffisance respiratoire aiguë	0	0	1	50	1	50

XI. 1. 2. Les décès par maladie respiratoire aux urgences La Rabta

La survenue d'un décès dans les services des urgences montre la gravité de l'état de santé du patient, elle peut être considérée aussi comme un échec de la prise en charge. Au service des urgences La Rabta, les maladies respiratoires ont été la cause de 55 décès en 2009, soit 7,3 % de l'ensemble des décès toutes maladies confondues.

La mortalité due aux maladies respiratoires a regroupé des affections d'évolution différente, aiguë ou chronique, elle varie selon l'âge, le genre et la maladie. Cependant, les causes de décès les plus fréquentes sont la pneumopathie suivie par l'embolie pulmonaire et la BPCO avec respectivement 58 % et 11 % des décès par maladies respiratoires (Fig. 128).

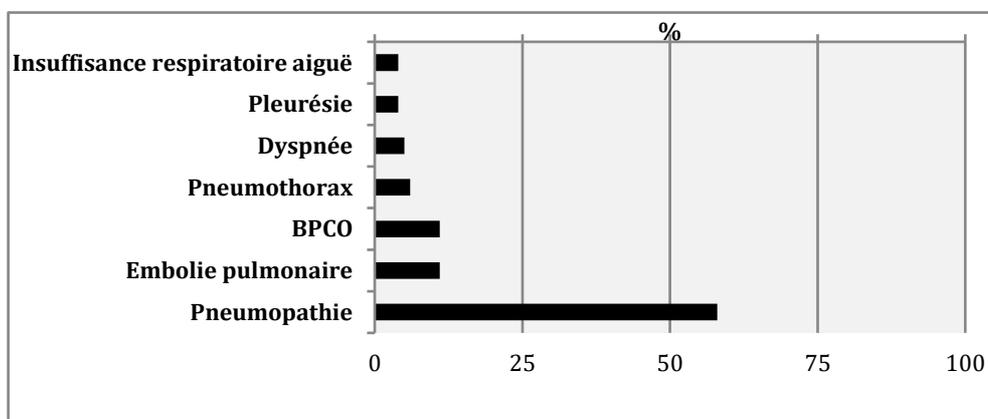


Figure 128 : Part des décès (en %) par pathologies respiratoires dans les urgences La Rabta en 2009.

Nous comptons plus de décès chez les hommes que chez les femmes. Les hommes représentent 69 % du total des décès et seulement 15 % du total des hommes hospitalisés. D'autre part, les femmes représentent 31 % du total des décès et 11 % du total des femmes hospitalisées.

La répartition varie aussi selon l'âge. Les sujets les plus âgés (65 ans et plus) sont les plus vulnérables au décès par une pathologie respiratoire. Ils représentent 66 % du total des décès avec 66 %, ils dépassent donc, largement leurs homologues plus jeunes : les sujets entre 45 et 64 ans représentent 23 % et les moins de 45 ans ne représentent que 11 % (Fig. 129).

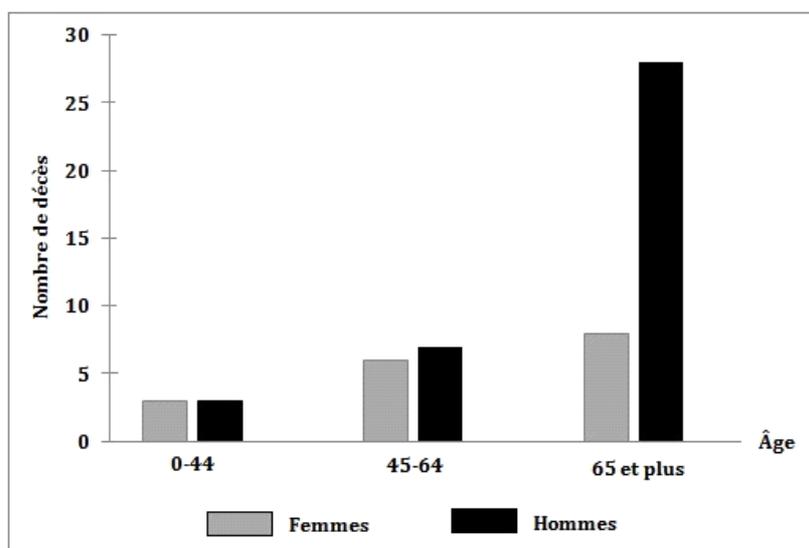


Figure 129 : Pourcentages des décès selon le groupe d'âge aux urgences La Rabta en 2009.

XI. 2. REPARTITION TEMPORELLE DES HOSPITALISATIONS ET DES TYPES DE PATHOLOGIES RESPIRATOIRES AUX URGENCES LA RABTA

XI. 2. 1. Variabilité des hospitalisations aux urgences La Rabta

La variabilité temporelle des hospitalisations a été envisagée de façon globale, pour l'ensemble des admissions aux urgences La Rabta pour tout type de maladie de l'appareil respiratoire. La figure 130 montre que les hospitalisations sont réparties sur toute l'année avec une augmentation pendant les jours paroxysmiques. 71 admissions ont été enregistrées avec des jours frais, pendant la saison froide (Octobre-mars). Pendant la saison chaude (avril-septembre), 42 admissions enregistrées avec des jours à forte chaleur et 22 admissions avec des jours à très forte chaleur. Le jour de pic d'hospitalisation en 2009 a été le 5 janvier, pendant la saison froide. Tandis que pendant la saison chaude, le jour de pic des admissions a été le 14 mai avec 6 admissions.

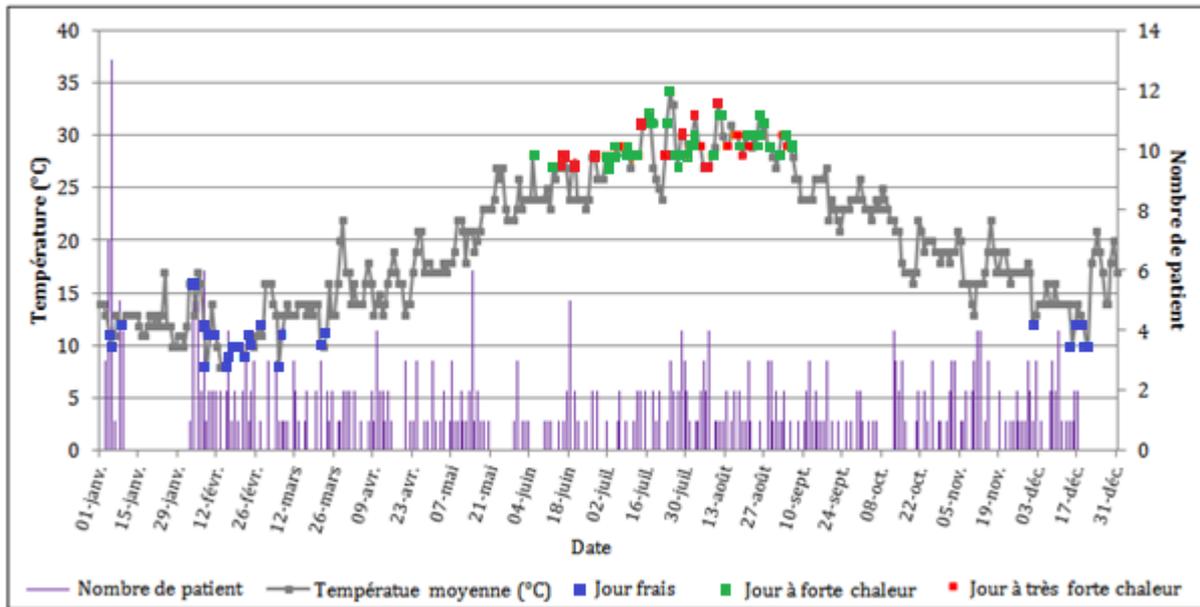


Figure 130 : Répartition quotidienne des admissions aux urgences La Rabta, la température moyenne (°C) et les jours paroxysmiques à la station de Tunis-Carthage en 2009 (INM).

A l'échelle de la semaine (Fig. 131), le lundi et le jeudi sont les deux jours qui enregistrent le plus d'hospitalisations (jusqu'à 73 cas le lundi) alors que le dimanche enregistre le plus faible nombre d'admissions (48 cas).

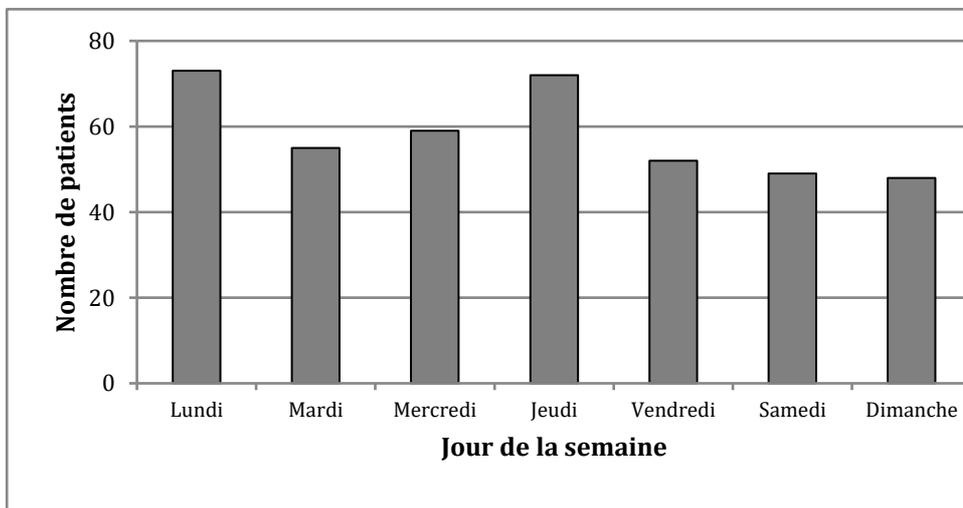


Figure 131 : Fréquence des admissions pour pathologie respiratoire aux urgences La Rabta dans la semaine en 2009.

Une légère prédominance hivernale des admissions par rapport aux autres saisons avec 26 %, puis en automne et au printemps avec 25 % chacun et enfin en été avec 24 % du total des admissions.

XI. 2. 2. Variabilité temporelle des pathologies aux urgences La Rabta

L'excès d'hospitalisations estimé pour toutes les saisons concerne en premier lieu les hospitalisations pour la pneumopathie. Elles sont légèrement plus élevées en été avec 54% du total des pathologies pendant cette saison, au printemps et en automne les nombres des hospitalisations sont égaux avec 49 admissions et avec des pourcentages, respectivement 49 % et 48 %. En hiver elles représentent 31 % du total des pathologies.

La dyspnée est un symptôme extrêmement fréquent en médecine d'urgence, elle se classe deuxième en hiver avec 19 %, après la pneumopathie. En effet, le plus grand nombre d'admissions pour dyspnée est enregistré pendant cette saison hivernale et 75 % des admissions ont été survenue entre le 03 et le 09 janvier 2009.

Au printemps, après la pneumopathie, l'embolie pulmonaire prédomine avec 21 % du total des pathologies de la saison. En automne aussi elle prédomine à côté de la BPCO avec 12 % chacune (Tab. 34).

Tableau 34 : Fréquence saisonnière de chaque pathologie respiratoire, par rapport au total des pathologies aux urgences La Rabta en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).

Pathologie	Saison			
	Hiver (%)	Printemps (%)	Eté (%)	Automne (%)
Asthme	17	4	3	7
BPCO	13	9	11	12
Bronchite	3	1	0	0
Détresse respiratoire	1	0	1	0
Dyspnée	19	5	4	3
Embolie pulmonaire	10	21	9	12
Pleurésie	3	3	6	6
Pneumopathie	31	49	54	48
Pneumothorax	4	8	10	10
Fibrose pulmonaire	0	1	0	0
Cancer	0	0	1	0
Emphysème	0	0	0	1
Insuffisance respiratoire	0	0	0	2

XI. 2. 3. Variabilité du nombre de consultations par jour

Le nombre quotidien des admissions aux urgences La Rabta a varié entre 0 et 13 avec une moyenne journalière d'une seule admission.

Le tableau 35 classe les jours selon le nombre d'admissions. Plus le nombre d'admissions est faible plus le nombre de jours est grand. Le nombre d'admissions à zéro admission prédomine et représente 41 % des jours en 2009. Le pic des admissions est au nombre de 13, enregistré le 5 janvier 2009.

Tableau 35 : Nombre de jours selon les admissions aux urgences La Rabta en 2009.
(Source des données : archives des urgences La Rabta).

Nombre d'admissions par jour	0	1	2	3	4	5	6	7	13
Nombre de jours	151	104	63	30	9	4	2	1	1

XI. 2. 4. Variabilité mensuelle des décès par maladies respiratoires

Durant l'année d'étude (2009), le nombre de décès est instable dans le temps. Nous n'avons pas enregistré de décès au mois de janvier. Au mois de février et mars, le nombre est relativement élevé puis régresse en avril et mai. Une remontée régulière a été enregistrée en été (juin, juillet et août) avec un pic en juillet de 9 décès. La mortalité reste élevée au mois de septembre puis décroît en octobre. Au mois de novembre, nous enregistrons un deuxième pic avec 9 décès (Fig. 132). Les personnes les plus âgées (65 ans et plus) meurent davantage en été et en automne, les moins jeunes (entre 45 et 64 ans) décèdent surtout en automne et pour les plus jeunes (mois de 45 ans), les décès sont répartis tout au long de l'année.

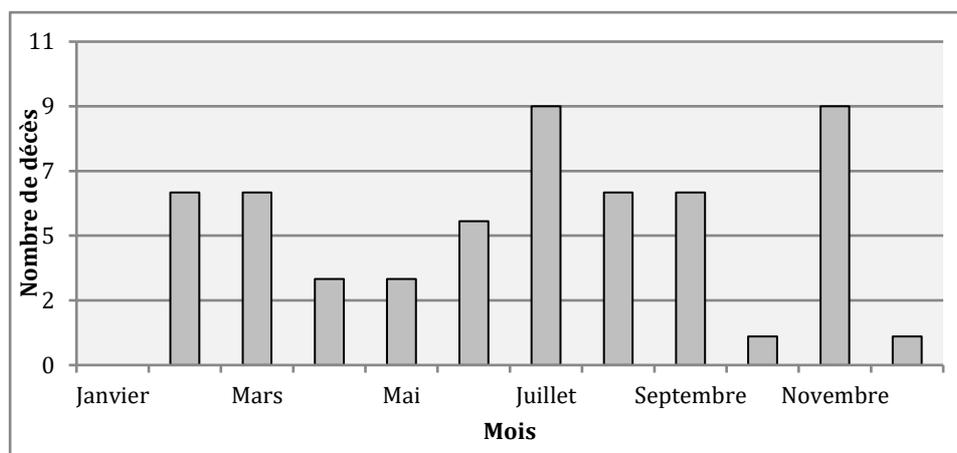


Figure 132 : Répartition mensuelle des décès aux urgences La Rabta en 2009 (source : Urgences La Rabta).

Les décès sont plus élevés chez les plus âgés et moins fréquents chez les plus jeunes : 36 décès (plus de 65 ans), 13 décès (45-64 ans) et 6 décès (0-44 ans) (Fig. 133).

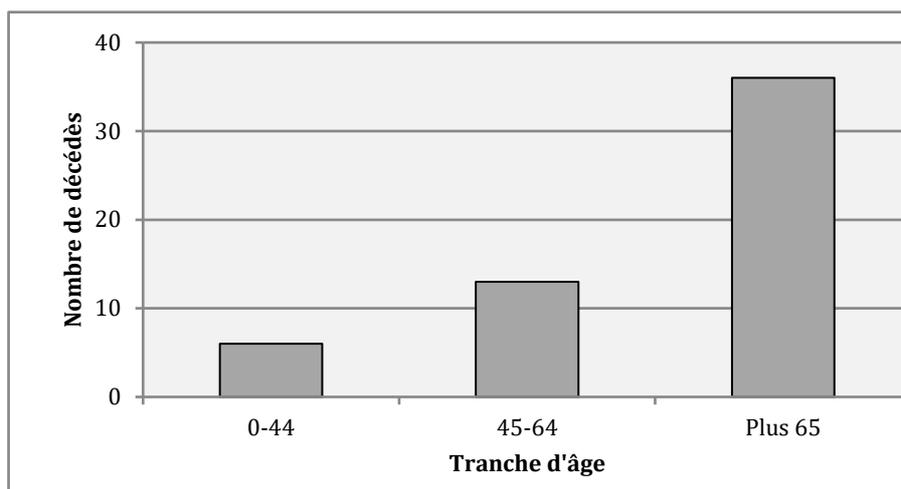


Figure 133 : Répartition saisonnière des décès par maladies respiratoires aux urgences La Rabta selon les groupes d'âges.

XI. 3. INDICATEURS ET SEUILS PREVISIONNELS D'EXCES D'HOSPITALISATION POUR PATHOLOGIES RESPIRATOIRES AUX URGENCES LA RABTA

La première étape, de cette démarche consiste à identifier les jours de pics des hospitalisations pour pathologies respiratoires aux urgences La Rabta et les épisodes correspondants. Ensuite, nous testerons les différents indicateurs biométéorologiques.

XI. 3. 1. Seuil critique des hospitalisations aux urgences et épisodes correspondants

Le calcul du 95^{ème} centile de la liste des hospitalisés aux urgences La Rabta est de 3 admissions. Trois est donc le seuil critique d'admission hospitalière. De ce fait, nous enregistrons 47 jours de pics avec 179 patients représentant 44 % du total des hospitalisations en 2009. Les jours de pics sont répartis sur toute l'année, variant d'un mois à un autre et d'une saison à une autre (Tab. 36).

Tableau 36 : Distribution mensuelle des jours de pic et le nombre d'hospitalisations à La Rabta en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).

Mois	Nombre de jours de pic	Nombre d'hospitalisations
Janvier	5	33
Février	6	26
Mars	4	12
Avril	4	13
Mai	3	12
Juin	1	5

Juillet	3	10
Août	5	16
Septembre	2	6
Octobre	4	13
Novembre	7	23
Décembre	3	10
Total	47	179

- Jours de pics de la saison froide

Pendant la saison froide (décembre, janvier, février et mars), nous comptons 18 jours de pics et 15 épisodes. Le nombre des hospitalisations aux urgences La Rabta a varié entre 3 et 13 (le 5 janvier) (Tab. 37).

Tableau 37 : Jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta pendant la saison froide en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).

Épisodes	Dates des pics	Nombre d'hospitalisations
Épisode 1	3 janvier	3
	4 janvier	7
	5 janvier	13
Épisode 2	8 janvier	5
	9 janvier	4
Épisode 3	3 février	5
Épisode 4	5 février	5
Épisode 5	7 février	6
Épisode 6	16 février	4
Épisode 7	22 février	3
Épisode 8	25 février	3
Épisode 9	2 mars	3
Épisode 10	5 mars	3
Épisode 11	11 mars	3
Épisode 12	21 mars	3
Épisode 13	2 décembre	3
Épisode 14	8 décembre	3
Épisode 15	10 décembre	4

- Jours de pics de la saison chaude

Les jours de pics pendant la saison chaude (juin, juillet, août et septembre) sont au nombre de 11 avec 9 épisodes. Le nombre d'hospitalisations est 37, le jour de pic des admissions est le 18 juin avec 5 hospitalisations (Tab. 38).

Tableau 38 : Jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta pendant la saison chaude en 2009. (*Source des données : archives des urgences La Rabta*).

Épisodes	Dates des pics	Nombre d'hospitalisations
Épisode 1	3 janvier	3
	4 janvier	7
	5 janvier	13
Épisode 2	8 janvier	5
	9 janvier	4
Épisode 3	3 février	5
Épisode 4	5 février	5
Épisode 5	7 février	6
Épisode 6	16 février	4
Épisode 7	22 février	3
Épisode 8	25 février	3
Épisode 9	2 mars	3
Épisode 10	5 mars	3
Épisode 11	11 mars	3
Épisode 12	21 mars	3
Épisode 13	2 décembre	3
Épisode 14	8 décembre	3
Épisode 15	10 décembre	4

- Jours de pics de la saison intermédiaire

La saison intermédiaire (octobre, novembre, avril et mai) a enregistré 18 jours de pics et 14 épisodes avec 61 hospitalisations aux urgences La Rabta. Le plus grand nombre d'admissions a été de 6, le 14 mai (Tab. 39).

Tableau 39 : Jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta pendant la saison intermédiaire en 2009. (*Source des données : archives des urgences La Rabta*).

Épisodes	Date des pics	Nombre d'hospitalisation
Épisode 1	10 avril	4
Épisode 2	20 avril	3
Épisode 3	24 avril	3
Épisode 4	30 avril	3
Épisode 5	7 mai	3
Épisode 6	14 mai	6
Épisode 7	30 mai	3
Épisode 8	12 octobre	4
	13 octobre	3
Épisode 9	15 octobre	3
Épisode 10	26 octobre	3
Épisode 11	2 novembre	3
	3 novembre	3
Épisode 12	10 novembre	3
	11 novembre	4
	12 novembre	4

Épisode 13	15 novembre	3
Épisode 14	29 novembre	3

XI. 3. 2. Détermination du seuil biométéorologique des extrêmes météorologiques

Pour la détermination du seuil biométéorologique des extrêmes météorologiques, nous allons tester les différents indicateurs biométéorologiques (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2") pour choisir les seuils optimaux de stress climatique pour les maladies respiratoires.

Les indicateurs météorologiques utilisés ont été, pour chaque jour, les valeurs maximales et minimales de la température de l'air ambiant (en °C) et de l'humidité relative (en %). Pour le vent, il s'agit de la vitesse maximale (en m/s). Ces indicateurs sont analysés par type de saison : la saison froide (décembre, janvier, février et mars), la saison estivale (juin, juillet, août et septembre) et l'intersaison (octobre, novembre, avril et mai).

XI. 4. SEUILS BIOMETEOROLOGIQUES DES EXTREMES METEOROLOGIQUES DE LA SAISON FROIDE

Les tableaux qui suivent montrent les résultats des extrêmes climatiques des jours de pics, des hospitalisations aux services des urgences La Rabta, enregistrées à Tunis-Carthage pendant la saison froide (décembre, janvier, février et mars), selon les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2").

Il y a 18 jours à prédire et 15 épisodes. Pour chaque valeur de sensibilité possible, nous avons retenu le seuil qui donne les meilleures performances.

Pour le choix d'un seuil biométéorologique prévisionnel d'excès d'hospitalisation pour tous types de pathologies respiratoires, nous avons en outre jugé qu'il était incontournable de prévoir correctement l'épisode 1 (du 3 au 5 janvier) qui enregistre le plus grand nombre d'hospitalisations aux urgences La Rabta pendant cette saison froide, mais aussi pendant toute l'année d'étude 2009 (13 hospitalisations, le 5 janvier).

XI. 4. 1. Indicateur basé sur les variables météorologiques du même jour : (C1, C2)

Pendant la saison froide, les variables météorologiques ont varié comme suit (Tab. 40) :

- la température : entre 5 et 23°C ;
- l'humidité relative de l'air : entre 33 et 100 % ;
- la vitesse maximale du vent : entre 4 et 14 m/s.

Tableau 40 : Résultats des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison froide. (*Source des données : INM et archives des urgences La Rabta*).

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité relative (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	03 janvier	10	16	63	88	7
	04 janvier	9	13	82	100	4
	05 janvier	8	13	58	100	9
Épisode 2	08 janvier	8	16	67	94	6
	09 janvier	8	17	72	100	4
Épisode 3	03 février	12	20	35	82	9
Épisode 4	05 février	10	23	33	87	7
Épisode 5	07 février	9	16	44	94	8
Épisode 6	16 février	6	13	44	81	4
Épisode 7	22 février	5	14	59	87	7
Épisode 8	25 février	8	12	71	93	11
Épisode 9	02 mars	11	21	56	100	4
Épisode 10	05 mars	10	16	42	88	14
Épisode 11	11 mars	8	18	45	87	9
Épisode 12	21 mars	8	12	35	93	11
Épisode 13	02 décembre	9	17	55	94	7
Épisode 14	08 décembre	9	19	52	100	7
Épisode 15	10 décembre	12	17	52	82	7

La température

D'après le tableau 41, le meilleur seuil thermique optimal est celui de **T min > 9°C** et **Tmax > 17°C**. Il prévoit 5 épisodes sur 15 dont l'épisode 1, présente une spécificité de 23 %, une sensibilité de 33,3 %, 23 fausses alertes et 6 jours de pics prévus sur 18.

Tableau 41 : Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
5	14	6	12	33,3	23	11,5	1-6-7-8-12
6	13	5	13	27,8	13	27,8	1-6-8-12
8	13	4	14	22,2	7	41,7	1-8-12
8	16	8	10	44,4	28	17,6	1-2-5-8-10-12
8	17	11	7	61,1	36	7,7	1-2-8-10-12-13-15
8	12	2	16	11,1	0	100	8-12
8	18	13	5	72,2	42	4,5	1-2-5-6-7-8-11-12-13-15
9	13	1	17	5,6	2	93,9	1
9	16	4	14	22,2	17	63	1-5-10

10	16	2	16	11,1	15	65,1	1-10
10	23	6	12	33,3	35	5,4	1-4-9-10-15
11	21	3	15	16,7	23	14,8	3-9-15
12	20	2	16	11,1	10	47,4	3-15
9	19	7	11	38,9	37	36,2	1-5-10-13-14-15
12	17	1	17	5,6	12	45,5	15
9	17	6	12	33,3	23	34,3	1-5-10-13-15

L'humidité

Le meilleur seuil optimal pour l'humidité relative est celui de : **Hmin > 56 % et Hmax > 100 %**. Ce seuil prévoit 5 épisodes sur 15 dont l'épisode 1. Il présente une sensibilité de 44,4 % et une spécificité de 35,9 %. Il prévoit 8 jours de pic sur 18 et 59 jours de fausses alertes en 4 mois (Tab. 42).

Tableau 42 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1, C2).
(Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
33	87	5	13	27,8	2	90,5	3-4-6-7-11-15
35	82	3	15	16,7	2	0	3-6
35	93	3	15	16,7	43	0	1-3-6-7-8-10-11-12-15
42	88	6	12	33,3	11	35,3	6-7-10-11
44	94	9	9	50	11	0	1-2-5-6-7-8-10-11-13-15
44	81	1	17	5,6	18	14,3	6
45	87	3	15	16,7	30	3,2	7-11-15
52	100	11	7	61,1	65	14,5	1-2-7-8-9-13-14-15
52	82	1	17	5,6	6	64,7	15
55	94	5	13	27,8	3	90,9	2-7-8-13
56	100	8	10	44,4	59	35,9	1-2-7-8-9
58	100	7	11	38,9	45	0	1-2-7-8
59	87	1	17	5,6	32	3	1-7
63	88	1	17	5,6	22	21,4	1
67	94	2	16	11,1	52	0	2-8
71	93	1	17	5,6	40	58,8	8
72	100	2	16	11,1	57	0	1-2
82	100	1	17	5,6	5	84,8	1

Le vent

Le meilleur seuil optimal pour la vitesse maximale du vent est celui de **Vmax > 4 m/s**. Ce seuil présente la meilleure spécificité (86,4 %) et une sensibilité de 22,2 %. Il prévoit 4 jours de pic sur 18 et seulement 14 jours de fausses alertes en 4 mois, mais ne prévoit que 4 épisodes sur 15 (Tab. 43).

Tableau 43 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
4	4	14	22,2	14	86,4	1-2-6-9
6	5	13	27,8	40	61,2	1-2-6-9
7	11	7	61,1	61	40,8	1-2-4-7-9-13-14-15
8	12	6	66,7	65	36,9	1-2-4-5-6-7-9-13-14-15
9	15	3	83,3	76	26,2	1-2-3-4-5-6-7-9-11-12-13-14-15
11	17	1	94,4	96	6,8	1-2-3-4-5-6-7-8-9-11-12-13-14-15
14	18	0	100,0	101	1,9	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15

XI. 4. 2. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur deux jours : (C1', C2')

Les résultats des moyennes des variables météorologiques du jour de pic et le jour qui précède sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 44). Ce tableau montre que :

- la température a varié entre 5 et 21°C ;
- l'humidité relative de l'air a varié entre 38 et 98 % ;
- la vitesse maximale du vent a varié entre 5 et 12 m/s.

Tableau 44 : Résultats des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions hospitalières et les jour-1, aux services des urgences La Rabta pendant la saison froide. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité relative (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max (m/s)
Épisode 1	03 janvier	9	18	51	94	5
	04 janvier	10	15	64	94	5
	05 janvier	9	13	68	96	6
Épisode 2	08 janvier	8	16	53	88	7
	09 janvier	8	17	62	92	5
Épisode 3	03 février	13	20	38	85	9
Épisode 4	05 février	10	21	38	86	7
Épisode 5	07 février	10	18	41	90	8
Épisode 6	16 février	6	13	53	85	5
Épisode 7	22 février	5	14	57	91	6
Épisode 8	25 février	8	13	73	96	9

Épisode 9	02 mars	12	21	50	94	5
Épisode 10	05-mars	11	18	50	94	12
Épisode 11	11-mars	9	18	47	87	8
Épisode 12	21-mars	9	15	43	95	11
Épisode 13	02-décembre	10	16	46	86	9
Épisode 14	08-décembre	9	20	55	98	5
Épisode 15	10-décembre	13	18	56	92	9

La température

Le meilleur seuil optimal pour la température est celui de **Tmin > 9°C** et **Tmax > 18°C**. Ce seuil prévoit 7 épisodes sur 15 dont l'épisode 1. Il présente une sensibilité de 38,9 % et une bonne spécificité (39,6 %). Il prévoit 7 jours sur 18 et 29 jours de fausses alertes en 4 mois (Tab. 45).

Tableau 45 : Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1', C2'). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
5	14	4	14	22,2	23	76,5	1-6-7-8
6	13	13	5	72,2	13	86,2	1-6-8
8	16	12	6	66,7	28	17,6	1-2-6-7-8-12-13
8	17	5	13	27,8	35	7,9	1-2-8-12-13
8	13	2	16	11,1	7	73,1	1-8
9	13	1	17	5,6	2	95,7	1
9	15	3	15	16,7	7	50	1-12
9	18	7	11	38,9	29	39,6	1-5-10-11-12-13-15
9	20	9	9	50	42	8,7	1-3-5-10-11-12-13-14-15
10	15	1	17	5,6	5	80	1
10	21	8	10	44,4	32	0	1-3-4-5-9-10-13-15
10	16	2	16	11,1	14	66,7	1-13
10	18	4	14	22,2	23	61,7	1-5-10-13-15
11	18	2	16	11,1	14	75,9	10-15
12	21	3	15	16,7	12	29,4	3-9-15
13	20	2	16	11,1	4	76,5	3-15
13	18	1	17	5,6	1	96,7	15

L'humidité relative

Le meilleur seuil optimal hygrométrique est celui de **Hmin > 55 %** et **Hmax > 91 %**. Ce seuil prévoit 5 épisodes sur 15 dont l'épisode 1. Il présente une sensibilité de 27,8 % et

une forte spécificité (59,4 %). Il prévoit 5 jours de pic sur 18 et seulement 13 jours de fausses alertes en 4 mois (Tab. 46).

Tableau 46 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1', C2').
(Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
35	77	1	17	5,6	6	33,3	3
39	88	6	12	33,3	37	2,6	2-3-4-6-7-11-15
42	93	10	8	55,6	44	0	1-5-6-7-9-10-12-13-15
45	91	9	9	50	30	14,3	1-2-5-6-7-10-11-13-15
48	94	11	7	61,1	56	6,7	1-2-6-7-8-9-10-11-13-15
49	84	1	17	5,6	7	73,1	6
50	88	4	14	22,2	21	27,6	2-6-7-11-15
51	91	6	12	33,3	20	50	1-7-10-13-15
51	100	11	7	61,1	62	0	1-2-7-8-10-13-14-15
55	91	5	13	27,8	13	59,4	1-2-7-13-15
55	87	1	17	5,6	7	80	2-7
55	91	5	13	27,8	13	50	1-2-7-13-15
58	88	2	16	11,1	8	73,3	2-15
70	97	3	15	16,7	8	65,2	1-8
70	100	4	14	22,2	13	0	1-2-8
73	94	2	16	11,1	4	81	1-8
74	94	1	17	5,6	4	81	8

Le vent

Le meilleur seuil optimal anémométrique est celui de **Vmax > 6 m/s**. Ce seuil présente la meilleure spécificité (61,2 %) et une sensibilité de 44,4 %. Il prévoit 6 jours de pic sur 18 et 40 jours de fausses alertes en 4 mois mais ne prévoit que 5 épisodes sur 15 (Tab. 47).

Tableau 47 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1', C2').
(Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
5	6	12	33,3	20	41,2	1-2-6-14
6	8	10	44,4	40	61,2	1-2-6-7-9
7	10	8	55,6	61	40,8	1-2-4-6-7-9-14
8	12	6	66,7	65	36,9	1-2-4-5-6-7-9-11-14
9	16	2	88,9	76	26,2	1-2-3-4-5-6-7-8-9-11-13-14-15
11	17	1	94,4	96	6,8	1-2-3-4-5-6-7-8-9-11-12-13-14-15
12	18	0	100	98	3,9	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15

XI. 4. 3. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur trois jours : (C1", C2")

Le tableau suivant, résume les résultats obtenus des mesures des variables météorologiques enregistrées durant les jours de pics des hospitalisations aux urgences La Rabta et j-2 pendant la saison 2009. Les variables météorologiques ont varié comme suit (Tab. 48) :

- la température : entre 5 et 20°C ;
- l'humidité relative de l'air : entre 38 et 98 % ;
- la vitesse maximale du vent : entre 4 et 10 m/s.

Tableau 48 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières et les deux jours précédents, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison froide en 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité relative (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max (m/s)
Épisode 1	03 janvier	9	19	51	94	5
	04 janvier	9	16	64	94	4
	05 janvier	9	14	68	96	6
Épisode 2	08 janvier	8	15	53	88	6
	09 janvier	8	16	62	92	6
Épisode 3	03 février	11	19	38	85	9
Épisode 4	05 février	10	20	38	86	7
Épisode 5	07 février	10	20	41	90	8
Épisode 6	16 février	5	12	53	85	6
Épisode 7	22 février	6	14	57	91	6
Épisode 8	25 février	9	13	73	96	8
Épisode 9	02 mars	9	20	50	94	6
Épisode 10	05 mars	10	19	50	94	10

Épisode 11	11 mars	9	18	47	87	8
Épisode 12	21 mars	9	16	43	95	9
Épisode 13	02 décembre	11	17	46	86	9
Épisode 14	08 décembre	10	20	55	98	5
Épisode 15	10 décembre	11	18	56	92	8

La température

Par comparaison aux autres seuils de l'indicateur (C1", C2"), le seuil optimal est : **Tmin > 9°C** et **Tmax > 18°C**. Il prévoit 6 épisodes dont l'épisode 1, présente une sensibilité de 44,4 %, une spécificité de 26,3 % avec 28 fausses alertes en 4 mois (Tab. 49).

Tableau 49 : Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
5	12	1	17	5,6	7	30	6
6	14	3	15	16,7	20	16,7	1-7-8
8	15	3	15	16,7	15	42,3	1-2-8
8	16	6	12	33,3	28	17,6	1-2-8-12
9	19	10	8	55,6	37	17,8	1-2-3-8-10-11-12-13-15
9	13	1	17	5,6	3	91,2	8
9	16	4	14	22,2	17	48,5	1-8-12
9	14	2	16	11,1	5	83,9	1-8
9	20	14	4	77,8	42	8,7	1-3-4-5-8-9-10-11-12-13-14-15
9	18	8	10	44,4	28	26,3	1-8-11-12-13-15
10	20	7	11	38,9	31	18,4	3-4-5-10-13-14-15
10	19	4	14	22,2	27	32,5	3-10-13-15
11	17	1	17	5,6	12	50	13
11	19	3	15	16,7	18	43,8	3-13-15

L'humidité relative

Le seuil thermique idéal pour cet indicateur (C1", C2") est : **Hmin > 55 %** et **Hmax > 98 %**. Il prévoit 5 épisodes dont l'épisode 1, présente une sensibilité de 38,9 %, une spécificité de 20,5 % avec 35 fausses alertes en 4 mois (Tab. 50).

Tableau 50 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
38	86	4	14	22,2	17	19	3-4-6-13
38	85	2	16	11,1	17	19	3
41	90	5	13	27,8	34	2,9	5-6-11
43	95	12	6	66,7	66	22,4	1-2-3-4-6-7-9-10-11-12-13-15
46	86	1	17	5,6	10	63	6-13
47	87	2	16	11,1	16	44,8	6-11
50	94	9	9	50	50	12,3	1-2-6-7-9-10-15
51	94	7	11	38,9	49	12,5	1-2-6-7-15
53	88	2	16	11,1	15	68,8	2-6
53	85	1	17	5,6	5	86,5	6
55	98	7	11	38,9	35	20,5	1-7-8-14-15
56	92	3	15	16,7	6	77,8	2-7-15
57	91	1	17	5,6	8	72,4	7
62	92	1	17	5,6	4	87,5	2
64	94	1	17	5,6	16	46,7	1
68	96	2	16	11,1	8	63,6	1
73	96	1	17	5,6	4	81	8

Le vent

Le meilleur seuil optimal pour la vitesse maximale du vent est celui de **Vmax > 6 m/s**. Ce seuil présente une spécificité de 61,2 % et une sensibilité de 50 %. Il prévoit 9 jours de pic sur 18 et 40 jours de fausses alertes en 4 mois mais ne prévoit que 5 épisodes sur 15 (Tab. 51).

Tableau 51 : Seuils optimaux du vent (m/s) avec l'indicateur (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
4	1	17	5,6	14	86,4	1
5	3	15	16,7	20	41,2	1-14

6	9	9	50	40	61,2	1-2-6-9-14
7	10	8	55,6	61	40,8	1-2-4-6-9-14
8	14	4	77,8	65	36,9	1-2-4-5-6-8-9-11-14-15
9	17	1	94,4	76	26,2	1-2-3-4-5-6-7-8-9-11-12-13-14-15
10	18	0	100	89	13,6	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15

XI. 4. 4. L'indicateur biométéorologique le plus pertinent pendant la saison froide

Le choix parmi les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"), nous permet de déduire le seuil biométéorologique optimal pour chaque paramètre météorologique.

La température

L'analyse effectuée pour la recherche d'un seuil biométéorologique thermique prévisionnel d'excès d'hospitalisation pour pathologie respiratoire nous a amené à recommander l'utilisation simultanée de la température (Tmin et Tmax) moyennées sur deux jours consécutifs (j et j-2), comme principal indicateur pour prévoir les épisodes d'excès d'admissions hospitalières aux urgences La Rabta, avec **Tmin > 9°C** et **Tmax > 18°C**. Ce seuil présente la spécificité la plus importante (39,6 %) entre les trois indicateurs, il présente 29 fausses alertes pendant 4 mois, une sensibilité de 38,9 %, prévoit 7 jours de pic sur 18. De plus, il prévoit le plus grand nombre d'épisodes (7 épisodes) (Tab. 52). En effet, nous pouvons prévoir la survenue d'un épisode d'admission hospitalière pour pathologie respiratoire, à cause thermique, débutant du deuxième jour lorsque ces seuils sont atteints.

Tableau 52 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Indicateur	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	9	17	6	12	33,3	23	34,3	1-5-10-13-15
(C1', C2')	9	18	7	11	38,9	29	39,6	1-5-10-11-12-13-15
(C1", C2")	9	18	8	10	44,4	28	26,3	1-8-11-12-13-15

L'humidité relative

Pour l'humidité relative, le seuil de l'indicateur moyenné sur deux jours (C1', C2') est le meilleur, avec **Hmin > 55 %** et **Hmax > 91 %**. Il présente la meilleure spécificité (59,4 %) avec une sensibilité de 27,8 %, le plus faible nombre de fausses alertes (13 jours), prévoit 5 jours de pics sur 18 et 5 épisodes (Tab. 53). Comme pour la température, si ces seuils sont atteints, ils peuvent déclencher des détresses respiratoires aiguës même après 48h.

Tableau 53 : Seuils optimaux avec l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Indicateur	Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	56	100	8	10	44,4	59	35,9	1-2-7-8-9
(C1', C2')	55	91	5	13	27,8	13	59,4	1-2-7-13-15
(C1", C2")	55	98	7	11	38,9	35	20,5	1-7-8-14-15

Le vent

Le seuil de **Vmax > 6 m/s** de l'indicateur moyenné sur 3 jours (C1", C2") est le meilleur seuil anémométrique. Il présente une forte spécificité (61,2 %), 5 épisodes, un fort nombre de fausses alertes et prévoit 9 jours de pics (Tab. 54).

Si ces seuils de l'indicateur (C1", C2") sont atteints, en surveillant les prévisions météorologiques des 72 heures à venir, nous pouvons anticiper la survenue d'un épisode d'admissions hospitalières pour pathologies respiratoires, débutant au troisième jour.

Tableau 54 : Seuils optimaux avec la vitesse maximale du vent (m/s) avec les trois indicateurs (C1, C2), (C1', t2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Indicateur	Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	4	4	14	22,2	14	86,4	1-2-6-9
(C1', C2')	6	8	10	44,4	40	61,2	1-2-6-7-9
(C1'', C2'')	6	9	9	50	40	61,2	1-2-6-9-14

Globalement, les limites de tolérance de la saison froide (décembre, janvier, février et mars) varient entre une température nocturne de 9°C et une diurne de 18°C (type de temps frais). Pour l'humidité relative, les limites se situent entre 55 % et 91 %. Ainsi, en surveillant les prévisions météorologiques des 48 heures à venir, nous pouvons anticiper la survenue d'un épisode d'admission hospitalière pour pathologies respiratoires, à cause de la température et de l'humidité de l'air, débutant du deuxième jour lorsque ces seuils sont atteints. Ces seuils s'accroissent avec une vitesse maximale du vent supérieure à 6 m/s une valeur susceptible de déclencher des détresses respiratoires aiguës même après 72h.

XI. 4. 5. Les jours de pics des admissions hospitalières et types de stress météorologiques pendant la saison froide

Le tableau suivant (Tab. 55) présente les jours de pics des admissions hospitalières pendant la saison froide (décembre, janvier, février et mars) et les paramètres météorologiques calculés selon les seuils optimaux des indicateurs choisis en haut.

Tableau 55 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences La Rabta et les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison froide 2009. (Source des données INM et archives des urgences La Rabta).

Dates des pics	Nombre de patients	Température (°C) (C1', C2')		Humidité (%) (C1', C2')		Vent (m/s) (C1'', C2'')
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Maximum
03 janvier	3	9	19	55	91	5
04 janvier	7	9	16	73	94	4
05 janvier	13	9	14	70	100	6
08 janvier	5	8	15	58	88	6
09 janvier	4	8	16	70	97	6
03 février	5	11	19	35	77	9

05 février	5	10	20	39	88	7
07 février	6	10	20	45	91	8
16 février	4	5	12	49	84	6
22 février	3	6	14	55	87	6
25 février	3	9	13	74	94	8
02 mars	3	9	20	48	94	6
05 mars	3	10	19	51	91	10
11 mars	3	9	18	50	88	8
21 mars	3	9	16	42	93	9
02 décembre	3	11	17	55	91	9
08 décembre	3	10	20	51	100	5
10 décembre	4	11	18	58	88	8

D'après le tableau 55, nous classons les jours de pics selon les types de stress météorologiques :

-Pics liés à un stress météorologique à un seul composant

Ce sont les pics succédant à un stress d'un seul paramètre météorologique extrême. Durant la saison hivernale, nous comptons 7 jours de pics et 4 situations de stress météorologique :

- 3 pics liés à stress thermique : deux pics de froid (8 janvier et 22 février 2009) et un pic de chaleur (3 janvier 2009) ;
- 2 pics liés à un stress hygrométrique avec une humidité maximale : le 4 et le 5 janvier 2009 ;
- 2 pics liés à un stress anémométrique : le 2 et le 10 décembre 2009.

- Pics liés à un stress météorologique à deux composants

Ce sont les pics succédant à deux stress météorologiques. Il y a 8 jours de pics et 6 situations de stress météorologiques :

- 2 pics liés à un stress thermique et hygrométrique : un pic avec une température minimale et une humidité minimale d'une part (le 16 février 2009), d'autre part, un pic avec une température maximale et une humidité minimale et maximale (le 2 mars 2009) ;
- 4 pics succédant à un stress hygrométrique et anémométrique : 2 pics suite à une humidité minimale et une vitesse maximale du vent (le 3 février et le 11 mars 2009), un pic lié à une humidité maximale et une vitesse maximale du vent (le 25 février 2009) et un pic lié à une vitesse maximale du vent, une humidité minimale et maximale (le 21 mars 2009) ;

- 2 pics liés à un stress thermique et hygrométrique : température maximale et humidité maximale (le 8 décembre 2009) et température minimale et humidité maximale (le 9 janvier 2009) ;

- Pics liés à un stress météorologique à composants multiples

Ce sont les pics succédant à un stress météorologique des trois variables météorologiques (température, humidité relative et vent). Il y a une seule situation et 3 jours de pics avec une température maximale, une humidité minimale et une vitesse de vent maximale : le 5 février, le 7 février et le 5 mars 2009.

XI. 5. SEUILS BIOMETEOROLOGIQUES DES EXTREMES METEOROLOGIQUES DE LA SAISON CHAUDE

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des hospitalisations, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude, selon les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). Il y a 11 jours à prédire et 9 épisodes. Pour chaque valeur de sensibilité possible, nous avons retenu le seuil qui donne les meilleures performances. Pour le choix d'un seuil, nous avons jugé aussi qu'il était incontournable de prévoir correctement l'épisode 5 (le 7 août), l'épisode 6 (le 21 août) ou l'épisode 7 (le 28 et 29 août) qui coïncident avec la plus grande vague de chaleur qu'a connue le pays entre 2005 et 2011 (chapitre IV).

XI. 5. 1. Indicateur basé sur les variables météorologiques du même jour : (C1, C2)

Pendant la saison chaude (juin, juillet, août et septembre), les variables météorologiques ont varié comme suit (Tableau 56) :

- la température : entre 17 et 44 °C ;
- l'humidité relative de l'air : entre 11 et 94 % ;
- la vitesse maximale du vent a varié entre 5 et 9 m/s.

Tableau 56 : Résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	18-juin	17	33	22	88	5
Épisode 2	24 juillet	25	44	11	78	4
Épisode 3	28 juillet	22	38	21	74	7
	29 juillet	24	37	34	94	7
Épisode 4	05 août	23	32	40	78	8

Épisode 5	07 août	20	34	29	88	5
Épisode 6	21 août	24	35	30	94	6
Épisode 7	28 août	24	35	32	89	9
	29 août	24	34	44	83	8
Épisode 8	12 septembre	19	31	21	73	6
Épisode 9	18 septembre	23	32	31	89	6

Les résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude sont comme suit :

La température

Le calcul du meilleur seuil thermique optimal donne : **T min > 24°C** et **Tmax > 35°C**. Ce seuil prévoit 2 épisodes sur 9 dont deux épisodes de la plus grande vague de chaleur (les épisodes 6 et 7), présente une spécificité de 24 % et une sensibilité de 27,3 % avec 19 jours de fausses alertes en 4 mois et 3 jours prévus de pics des hospitalisations sur 11 (Annexe VII. 1).

L'humidité relative

Le seuil hygrométrique optimal est celui de **Hmin > 29 %** et **Hmax > 88 %**. Il prévoit 3 épisodes sur 9 dont deux épisodes de la plus grande vague de chaleur (les épisodes 5 et 7), présente une spécificité de 14,8 % et une sensibilité 27,3 % avec 46 fausses alertes en 4 mois et 3 jours de pic prévus sur 11 (Annexe VII. 2).

Le vent

Le meilleur seuil de la vitesse maximale du vent, de l'indicateur (C1, C2), sera celui de **Vmax > 6 m/s**. Ce seuil représente une forte spécificité (57,8 %), une forte sensibilité (54,5 %). Il prévoit 6 jours sur 11 et 6 épisodes dont deux épisodes parmi nos incontournables (épisodes 5, 6, et 7) et avec 46 jours de fausses alertes en 4 mois (Annexe VII. 3).

XI. 5. 2. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur deux jours : (C1', C2')

Les résultats de calcul de la sensibilité et spécificité, basé sur les températures minimales et maximales du jour j et jour-1 sont présentées dans le tableau suivant (Tab. 57) :

Tableau 57 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme et les jours-1, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	18 juin	18	34	23	94	5
Épisode 2	24 juillet	24	42	16	76	6
Épisode 3	28 juillet	21	36	28	79	6
	29 juillet	23	38	28	84	7
Épisode 4	05 août	24	33	34	84	8
Épisode 5	07 août	21	34	30	83	5
Épisode 6	21 août	24	36	31	94	6
Épisode 7	28 août	25	36	31	84	9
	29 août	24	35	38	86	8
Épisode 8	12 septembre	20	30	28	76	7
Épisode 9	18 septembre	22	31	37	86	5

La température

Le meilleur seuil thermique pour cet indicateur sera celui de : **Tmin > 24°C et Tmax > 42°C**. Ce seuil représente une sensibilité de 45,5 %, une spécificité de 35 %, prévoit 5 jours de pic sur 11 et 4 épisodes dont deux parmi nos incontournables avec 35 jours de fausses alertes en 4 mois (Annexe VII. 4).

L'humidité relative

Le choix du meilleur seuil de l'humidité relative est limité entre les seuils qui prévoient au moins un épisode parmi les épisodes 5, 6 et 7, qui sont au nombre de 4 d'après le tableau 62. Parmi ces 4 seuils, le meilleur est celui de **Hmin > 28 % et Hmax > 84 %** car il présente une forte sensibilité (54,5 %), une forte spécificité (50 %) et le plus faible nombre de fausses alertes (39 jours en 4 mois) (Annexe VII. 5).

Le vent

Le meilleur seuil anémométrique, de l'indicateur (C1', C2'), sera celui de **Vmax > 6 m/s**. Ce seuil représente une spécificité de 57,8 % et une forte sensibilité de 54,5 %. Il prévoit 6 jours de pics sur 11 et 6 épisodes, dont deux épisodes parmi nos incontournables (épisodes 5, 6, et 7) et avec 46 jours de fausses alertes en 4 mois (Annexe VII. 6).

XI. 5. 3. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur trois jours : (C1", C2")

À partir des résultats des moyennes des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions hospitalières et les deux jours précédents, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude, les variables météorologiques ont varié comme suit (Tab. 58) :

- la température : entre 20 et 40°C ;
- l'humidité relative de l'air : entre 19 et 96 % ;
- la vitesse maximale du vent : entre 6 et 9 m/s.

Tableau 58 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières et les deux jours précédents, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude en 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	18-juin	20	33	22	89	7
Épisode 2	24-juillet	23	40	19	84	6
Épisode 3	28-juillet	22	35	27	78	7
	29-juillet	22	36	30	84	7
Épisode 4	05-août	24	33	39	87	8
Épisode 5	07-août	21	33	33	81	6
Épisode 6	21-août	23	35	28	96	6
Épisode 7	28-août	25	36	35	87	8
	29-août	25	35	35	83	9
Épisode 8	12-septembre	20	29	34	78	7
Épisode 9	18-septembre	22	30	45	87	6

La température

Le meilleur seuil thermique optimal sera celui de : **Tmin > 23°C** et **Tmax > 35°C**. Ce seuil représente une sensibilité de 27,3 %, une spécificité de 12,9 %. Il prévoit 3 jours de pic sur 11 et deux épisodes (6 et 7) qui sont parmi les épisodes inévitables, mais avec 27 jours de fausses alertes en 4 mois (Annexe. VII. 7).

L'humidité relative

Le choix du meilleur seuil de l'humidité relative est limité entre les seuils qui prévoient au moins un épisode parmi les épisodes 5, 6 et 7 qui sont au nombre de 7 (Annexe VI. 3. 2). Parmi ces seuils, le meilleur sera celui avec **Hmin > 35 %** et **Hmax > 87 %** car il présente une forte sensibilité (54,5 %), une forte spécificité (50 %) et le plus faible nombre de fausses alertes (39 jours en 4 mois) (Annexe VII. 8).

Le vent

Le calcul du meilleur seuil de la vitesse maximale du vent donne : **Vmax > 7 m/s**. Ce seuil représente une spécificité de 32,4 %, une forte sensibilité de 81,8 %. Il prévoit 9 jours de pics des admissions hospitalières sur 11 et 8 épisodes, dont les trois épisodes

qui sont nos incontournables (épisodes 5, 6 et 7) mais avec 75 jours de fausses alertes en 4 mois. (Annexe VII. 9).

XI. 5. 4. L'indicateur biométéorologique le plus pertinent pendant la saison chaude

Il s'agit de choisir le meilleur seuil biométéorologique parmi les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2").

La température

Le meilleur seuil de la température pour la saison chaude est celui de **Tmin > 24°C** et **Tmax > 35°C** de l'indicateur (C1, C2) basé sur les températures maximales et minimales du jour de pic des admissions hospitalières. Ce seuil présente une sensibilité de 27,3 %, prévoit 3 jours de pics sur 11, il ne présente pas la meilleure spécificité (24 %) mais il présente le plus faible nombre de fausses alertes avec seulement 19 jours en 4 mois car on ne tolère pas un grand nombre de fausses alertes (Tab. 59).

Tableau 59 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Indicateur	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	24	35	3	8	27,3	19	24,0	6-7
(C1', C2')	24	42	5	6	45,5	35	35,2	2-4-6-7
(C1", C2")	23	35	3	8	27,3	27	12,9	6-7

L'humidité relative

Pour l'humidité relative, le seuil de l'indicateur (C1", C2") est le meilleur avec **Hmin > 35 %** et **Hmax > 87 %**. Il présente la meilleure spécificité (55,3 %), une sensibilité de 36,4 %, prévoit 4 jours de pics sur 11, trois épisodes et surtout présente le plus faible nombre de fausses alertes (17 jours) (Tab. 60).

Tableau 60 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Indicateur	Hmin (°C)	Hmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	29	88	3	8	27,3	46	14,8	4-5-7
(C1', C2')	28	84	6	5	54,5	39	50	3-4-5-7-8

(C1", C2")	35	87	4	7	36,4	17	55,3	4-7-9
------------	----	----	---	---	------	----	------	-------

Le vent

Les deux indicateurs (C1, C2) et (C1', C2') représentent le même seuil avec **V_{max} > 6 m/s**. Ce dernier représente une spécificité de 57,8 %, une sensibilité de 54,5 %, prévoit 6 jours d'hospitalisation sur 11 et 6 épisodes ainsi que le plus faible nombre de fausses alertes avec 46 jours sur 4 mois (Tab. 61).

Tableau 61 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Indicateur	V _{max} (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	6	6	5	54,5	46	57,8	1-2-5-6-8-9
(C1', C2')	6	6	5	54,5	46	57,8	1-2-3-5-7-9
(C1", C2")	7	9	2	81,8	75	32,4	1-2-3-5-6-7-8-9

Globalement, les limites de tolérance de la saison chaude (juin, juillet, août et septembre) varient entre une température nocturne de 24°C et une diurne de 35°C (type de temps de forte chaleur) et à une vitesse du vent supérieure à 6 m/s. Même après 24h, des conséquences graves sur le système respiratoire peuvent emmener les personnes atteintes par une pathologie respiratoire à consulter aux urgences. Cependant, après 48h d'une humidité relative entre 35 % et 87 %, on peut prévoir une hausse des visites aux urgences pour causes respiratoires.

XI. 5. Les jours de pics et types de stress météorologiques

D'après le tableau 62, sur les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences La Rabta et les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison chaude 2009, la classification des jours de pics selon les types de stress météorologiques est comme suit :

-Pics liés à un stress météorologique à un seul composant

Quatre pics succèdent à un stress météorologique à un seul composant :

- un stress de froid le 12 septembre 2009 ;
- un stress hygrométrique (humidité minimale et maximale) : le 21 août 2009 ;
- deux pics de stress anémométriques : le 28 et 29 août 2009.

- Pics liés à un stress météorologique à deux composants

3 pics liés à un stress thermique et hygrométrique : 2 pics avec une température minimale et une humidité minimale (le 7 août et le 12 septembre 2009) ; un pic avec une température maximale et une humidité minimale (le 24 juillet 2009) et un pic lié à une température minimale, une humidité minimale et maximale (le 18 juin 2009) ;

-Pics liés à un stress météorologique à composants multiples

Trois pics succèdent à un stress météorologique à composants multiples : un pic avec une température minimale et maximale, une humidité minimale et une vitesse du vent maximale (le 28 juillet 2009) ; un pic avec une température maximale, une humidité minimale et une vitesse du vent maximale (le 29 juillet 2009) et un pic lié à une température minimale, une humidité minimale et une vitesse maximale du vent (le 5 août 2009).

Tableau 62 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences La Rabta et les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison chaude 2009. (Source des données : INM et urgences La Rabta).

Dates des pics	Nombre d'hospitalisations	Température (°C) (C1, C2)		Humidité (%) (C1", C2")		Vent (m/s) (C1, C2)
		Min	Max	Min	Max	Max
18 juin	5	17	33	22	89	5
24 juillet	3	25	44	19	84	4
28 juillet	4	22	38	27	78	7
29 juillet	3	24	37	30	84	7
05 août	3	23	32	39	87	8
07 août	4	20	34	33	81	5
21 août	3	24	35	28	96	6
28 août	3	24	35	35	87	9
29 août	3	24	34	35	83	8
12 septembre	3	19	31	34	78	6
18 septembre	3	23	32	45	87	6

XI. 6. SEUILS BIOMETEOROLOGIQUES DES EXTREMES METEOROLOGIQUES DE LA SAISON INTERMEDIAIRE

Dans la recherche du seuil biométéorologique critique définissant une admission exceptionnelle pendant la saison intermédiaire (avril, mai, octobre et novembre), nous devons tester les extrêmes météorologiques des jours de pics des hospitalisations, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison intermédiaire selon les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2").

Il y a 18 jours à prédire et 14 épisodes. Pour chaque valeur de sensibilité possible, nous avons retenu le seuil qui donne les meilleures performances.

Pour le choix d'un seuil, nous avons jugé aussi qu'il était incontournable de prévoir correctement l'épisode 6 (le 14 mai) qui coïncide avec le plus grand nombre d'hospitalisations (6 hospitalisations) durant toute la saison intermédiaire.

XI. 6. 1. Indicateur basé sur les variables météorologiques du même jour : (C1, C2)

Pendant la saison intermédiaire (avril, mai, octobre et novembre), les variables météorologiques ont varié comme suit (Tab. 63) :

- la température : entre 11 et 29°C ;
- l'humidité relative : entre 31 et 100 % ;
- la vitesse maximale du vent : entre 4 et 12 m/s.

Tableau 63 : Résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta, enregistrées à Tunis-Carthage pendant la saison intermédiaire 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité relative (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	10 avril	11	18	77	100	7
Épisode 2	20 avril	12	18	77	94	5
Épisode 3	24 avril	13	21	28	88	4
Épisode 4	30 avril	13	23	41	88	6
Épisode 5	07 mai	14	22	57	94	5
Épisode 6	14 mai	16	25	53	88	7
Épisode 7	30-mai	17	29	38	94	9
Épisode 8	12 octobre	19	27	54	83	9
	13 octobre	19	25	57	88	6
Épisode 9	15 octobre	17	23	56	88	5
Épisode 10	26 octobre	17	23	57	88	6
Épisode 11	02 novembre	15	23	36	94	5
	03 novembre	15	23	53	88	12
Épisode 12	10 novembre	11	18	67	94	9
	11 novembre	11	17	68	88	7
	12 novembre	11	19	60	94	4
Épisode 13	15 novembre	11	24	32	100	4
Épisode 14	29 novembre	13	22	31	94	7

La température

Le meilleur seuil thermique de l'indicateur (C1, C2) sera celui de : **Tmin > 12°C** et **Tmax > 26°C**, il est le seul qui prévoit l'épisode 6, notre incontournable. Il présente une forte

sensibilité (77,8 %) mais une spécificité nulle (0 %). Il prévoit 14 jours de pics sur 18 et 62 fausses alertes en 4 mois (Annexe VII. 10).

Humidité relative

Le seuil hygrométrique optimal est celui de **Hmin > 53 %** et **Hmax > 88 %**. Il prévoit 6 épisodes sur 14 (dont l'épisode 6) présente une sensibilité de 38,9 % et une spécificité de 28,6 % avec 17 fausses alertes en 4 mois et 7 jours de pic prévus sur 18 (Annexe VII. 11).

Le vent

Avec cet indicateur (C1, C2), trois seuils prévoient l'épisode 6. Parmi eux, le meilleur sera celui de : **Vmax > 7 m/s**. Il présente la meilleure spécificité (37,7 %), une forte sensibilité (77,8 %), prévoit 14 jours de pics sur 18 et les 14 épisodes avec 67 fausses alertes sur 4 mois (Annexe VII. 12).

XI. 6. 2. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur deux jours : (C1', C2')

Les résultats des moyennes des variables météorologiques du jour de pic et le jour qui précède sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 64). Ce tableau montre que :

- la température a varié entre 11 et 30°C ;
- l'humidité relative de l'air a varié entre 39 et 100 % ;
- la vitesse maximale du vent a varié entre 5 et 9 m/s.

Tableau 64 : Résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta 2009, enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison intermédiaire. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	10 avril	12	17	83	100	7
Épisode 2	20 avril	12	17	68	94	5
Épisode 3	24 avril	13	24	44	91	7
Épisode 4	30 avril	14	22	42	83	6
Épisode 5	07 mai	14	23	55	91	6
Épisode 6	14 mai	18	25	46	88	8
Épisode 7	30 mai	16	30	39	94	8
Épisode 8	12 octobre	19	26	54	89	9
	13 octobre	19	25	56	86	8

Épisode 9	15 octobre	17	23	55	86	8
Épisode 10	26 octobre	17	24	57	88	7
Épisode 11	02 novembre	14	24	45	94	4
	03 novembre	15	24	45	91	8
Épisode 12	10 novembre	11	17	58	88	9
	11 novembre	12	17	68	91	8
	12 novembre	12	21	64	91	6
Épisode 13	15 novembre	11	25	41	100	4
Épisode 14	29 novembre	13	23	41	91	6

La température

Deux seuils de l'indicateur (C1', C2') prévoient l'épisode 6. Le meilleur seuil optimal est celui de : **Tmin > 18°C** et **Tmax > 25°C**. Il présente une sensibilité de 18,8 %, une spécificité de 11,1 %, prévoit 2 jours sur 18 et 4 fausses alertes en 4 mois (Annexe VII. 13).

L'humidité relative

Le seuil hygrométrique optimal est celui de **Hmin > 46 %** et **Hmax > 88 %**. Il prévoit 5 épisodes sur 14 dont l'épisode 6, présente une sensibilité de 19,8 % et une sensibilité de 16,7 % avec 25 fausses alertes en 4 mois et seulement 3 jours prévus sur 18 (Annexe VII. 14).

Le vent

Deux seuils de l'indicateur (C1', C2') prévoient l'épisode 6. Parmi eux, le meilleur seuil sera celui de **Vmax > 8 m/s**. Il présente la meilleure spécificité (31,4 %), une forte spécificité (88,9 %), 16 jours prévus sur 18 ainsi que le plus faible nombre de fausses alertes avec 73 jours en 4 mois (Annexe VII. 15).

XI. 6. 3. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur trois jours : (C1", C2")

D'après les résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières et les deux jours précédant, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison intermédiaire (avril, mai, octobre et novembre 2009) les variables météorologiques ont varié comme suit (Tab. 65) :

- la température : entre 11 et 29°C ;
- l'humidité relative de l'air : entre 38 et 100 % ;
- la vitesse maximale du vent : entre 4 et 10 m/s.

Tableau 65 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières et les deux jours précédant, aux services des urgences La

Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude en 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Épisodes	Date	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	10 avril	11	18	76	100	8
Épisode 2	20 avril	12	18	68	94	6
Épisode 3	24 avril	13	21	57	94	7
Épisode 4	30 avril	13	23	38	81	6
Épisode 5	07 mai	14	22	54	88	7
Épisode 6	14 mai	16	25	43	92	8
Épisode 7	30 mai	17	29	40	90	8
Épisode 8	12 octobre	19	27	56	92	8
	13 octobre	19	25	55	88	8
Épisode 9	15 octobre	17	23	55	86	7
Épisode 10	26 octobre	17	23	56	86	10
Épisode 11	02 novembre	15	23	52	94	4
	03 novembre	15	23	47	92	7
Épisode 12	10 novembre	11	18	54	88	9
	11 novembre	11	17	61	88	9
	12 novembre	11	19	65	92	7
Épisode 13	15 novembre	11	24	46	100	4
Épisode 14	29 novembre	13	22	42	90	5

La température

Le meilleur seuil de la température pour la saison intermédiaire est celui de **Tmin > 16°C** et **Tmax > 25°C**. Ce seuil est le seul qui prévoit l'épisode 6. Présente une sensibilité de 27,3 %, une spécificité de 12,9 %. Il prévoit 3 jours sur 11, deux épisodes et 27 jours de fausses alertes en 4 mois (Annexe VII. 16).

L'humidité relative

Le seuil hygrométrique optimum pour cet indicateur (C1", C2") sera : **Hmin > 43 %** et **Hmax > 92 %**. Ce seuil est le seul qui prévoit l'épisode 6, présente une forte sensibilité (55,6 %), une spécificité de 17,6 % et 30 fausses alertes en 4 mois (Annexe VII. 17).

Le vent

Trois seuils de l'indicateur (C1", C2") prévoient l'épisode 6. Parmi eux, le seuil idéal est celui de **Vmax > 8 m/s**. Il présente la meilleure spécificité (31,4 %), une forte spécificité

(83,3 %), 15 jours prévus sur 18 ainsi que le plus faible nombre de fausses alertes avec 73 jours en 4 mois (Annexe VII. 18).

XI. 6. 4. L'indicateur biométéorologique le plus pertinent pendant la saison intermédiaire

Le choix parmi les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2") nous permet de déduire les seuils biométéorologiques au-delà desquels la santé respiratoire de la population tunisoise pourrait être exposée aux risques amenant à être hospitalisée aux urgences.

La température

Le meilleur seuil thermique pour la saison intermédiaire est celui de **Tmin > 18°C** et **Tmax > 25°C** de l'indicateur (C1', C2') basé sur la moyenne des températures maximales et minimales du jour de pic et j-1 des admissions hospitalières. Ce seuil présente une sensibilité de 11,1 %, une spécificité de 18,8 %, prévoit 2 jours sur 18 et ne présente que 4 jours de fausses alertes sur 4 mois (Tab. 66).

Tableau 66 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta)

Indicateur	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	12	26	14	4	77,8	62	0	4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14
(C1', C2')	18	25	2	16	11,1	4	18,8	6-8
(C1", C2")	16	25	4	14	22,2	12	7,6	6-9-10

L'humidité relative

Pour l'humidité relative, le seuil de l'indicateur (C1, C2) est le meilleur, basé sur la moyenne des humidités maximales et minimales du jour de pic des admissions hospitalières, avec **Hmin > 53 %** et **Hmax > 88 %**. Il présente la meilleure spécificité (28,6 %), une sensibilité de 38,9 %, prévoit 7 jours sur 18 et 6 épisodes sur 14. Il présente aussi le plus faible nombre de fausses alertes (17 jours en 4 mois) (Tab. 67).

Tableau 67 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Indicateur	Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	53	88	7	11	38,9	17	28,6	6-8-9-10-11-12
(C1', C2')	46	88	3	15	16,7	25	19,8	6-8-9-10-12

(C1", C2")	43	92	10	8	55,6	30	17,6	6-8-9-10-11-12
------------	----	----	----	---	------	----	------	----------------

Le vent

Le meilleur seuil pour la vitesse maximale du vent est : **Vmax > 7 m/s** de l'indicateur (C1, C2), basé sur la moyenne des températures maximales et minimales du jour de pic des admissions hospitalières. Ce seuil offre la meilleure spécificité (37,6 %), une forte sensibilité (77,8 %), prévoit tous les épisodes ainsi que le plus faible nombre de fausses alertes avec 67 jours sur 4 mois (Tab. 68).

Tableau 68 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Indicateur	Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	7	14	4	77,8	67	37,6	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14
(C1', C2')	8	16	2	88,9	73	31,4	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14
(C1", C2")	8	15	3	83,3	73	31,4	1-2-3-4-5-6-7-8-9-11-12-13-14

En somme, les limites de tolérance pendant la saison intermédiaire (avril, mai, octobre et novembre) calculées pour le Grand-Tunis face aux agressions hygrométriques varient entre 53 % et 88 % du jour même, et la situation peut s'aggraver avec une vitesse supérieure à 7 m/s. Une température variant entre 18°C et 25°C, peuvent causer de grandes répercussions sur la santé respiratoire dans le Grand-Tunis même après 48h.

XI. 6. 5. Les jours de pics et types de stress météorologiques pendant la saison intermédiaire

D'après le tableau 69, les jours de pics des admissions hospitalières pendant la saison intermédiaire (avril, mai, octobre et novembre) et les paramètres météorologiques calculés selon les seuils optimaux des indicateurs choisis en haut sont réparties comme suit :

-Pics liés à un stress météorologique à un seul composant

Six jours de pics succèdent à un stress météorologique à un seul composant, tous liés à un paroxysme de froid : le 24 avril, le 30 avril, le 14 mai, le 15 octobre, 26 octobre et le 11 novembre 2009.

- Pics liés à un stress météorologique à deux composants

Neuf jours de pics et deux situations succèdent à un stress météorologique à deux composants :

- sept pics liés à un stress thermique et hygrométrique avec une température minimale et une humidité maximale : le 10 avril, le 20 avril, le 7 mai et le 2 novembre, 12 novembre, 15 novembre et 29 novembre 2009 ;

- deux pics liés à un stress thermique et anémométrique : d'une part, une température maximale et une vitesse maximale du vent, le 12 octobre 2009 ; d'autre part, une température minimale et une vitesse maximale du vent : le 3 novembre 2009.

-Pics liés à un stress météorologique à composants multiples

Deux jours de pics succèdent à un stress météorologique à composants multiples, thermique, hygrométrique et anémométrique : le 30 mai 2009 avec une température maximale, une humidité maximale et une vitesse maximale du vent ; et le 10 novembre 2009 avec une température minimale, une humidité maximale et une vitesse maximale du vent.

Tableau 69 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences La Rabta, les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison intermédiaire en 2009. (Source des données INM et archives des urgences La Rabta)

Dates des pics	Nombre d'hospitalisations	Température (°C) C1', C2')		Humidité (%) (C1, C2)		Vent (m/s) (C1, C2)
		Min	Max	Min	Max	Max
10 avril	4	11	18	53	100	7
20 avril	3	12	18	53	94	5
24 avril	3	13	21	53	88	4
30 avril	3	13	23	53	88	6
07 mai	3	14	22	53	94	5
14 mai	6	16	25	53	88	7
30 mai	3	17	29	53	94	9
12 octobre	4	19	27	53	83	9
13 octobre	3	19	25	53	88	6
15 octobre	3	17	23	53	88	5
26 octobre	3	17	23	53	88	6
02 novembre	3	15	23	53	94	5
03 novembre	3	15	23	53	88	12
10 novembre	3	11	18	53	94	9
11 novembre	4	11	17	53	88	7
12 novembre	4	11	19	53	94	4
15 novembre	3	11	24	53	100	4
29 novembre	3	13	22	53	94	7

XI. 7. ESTIMATION DE L'IMPACT SANITAIRE DE LA POLLUTION EN PM10 SUR L'ADMISSION HOSPITALIERE AUX URGENCES LA RABTA

Nous allons étudier l'impact sanitaire de la pollution de l'air dans le Grand-Tunis sur les admissions hospitalières aux urgences La Rabta pour causes respiratoires. Dans un premier temps, nous décrirons les indicateurs environnementaux manifestés par les mesures de PM10 en relation avec le nombre d'hospitalisations puis nous allons estimer le nombre d'hospitalisations évitables à partir des trois scénarios.

XI. 7. 1. Le pic de pollution particulaire et ses impacts sanitaires

Un niveau exceptionnel des concentrations journalières des PM10a été enregistré le 3 février 2009 avec 481 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à la station de Beb Alioua, soit une augmentation de 336 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la journée précédente et de 221 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au-dessus de la norme tunisienne relative à la santé fixée à 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ce niveau remarquable de pollution particulaire s'est traduit par une hausse significative d'hospitalisations aux urgences La Rabta pour causes respiratoires à partir du jour de pic de pollution et les jours qui suivent. La figure 134 illustre bien cette relation de causalité.

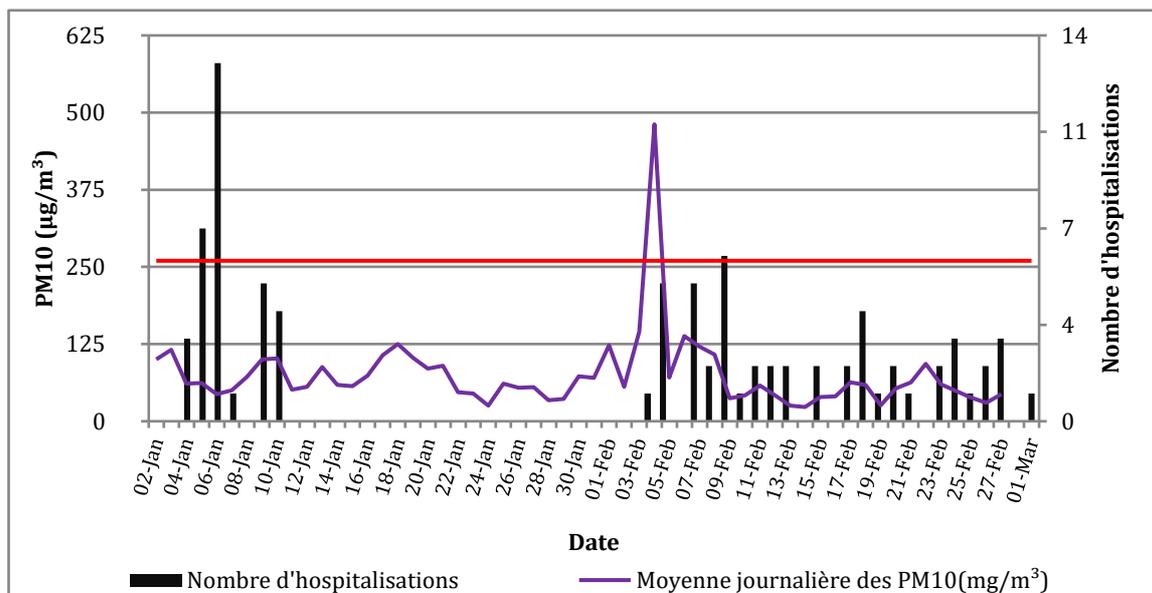


Figure 134 : Nombre d'hospitalisations aux urgences La Rabta et moyennes journalières des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans la station de Beb Alioua (ANPE) du 1^{er} janvier au 28 février 2009.

18 admissions ont été enregistrées entre le 3 et le 7 février soit une augmentation de 64 % en un seul mois (entre le 7 janvier et le 7 février 2009) sachant qu'aucune admission aux urgences La Rabta n'a été enregistrée depuis le 10 janvier 2009.

Une comparaison entre les admissions hospitalières pour des causes respiratoires avant et après le pic de pollution particulaire, montre que les hospitalisations aux urgences La Rabta étaient significativement associées aux particules en suspension (Fig. 135).

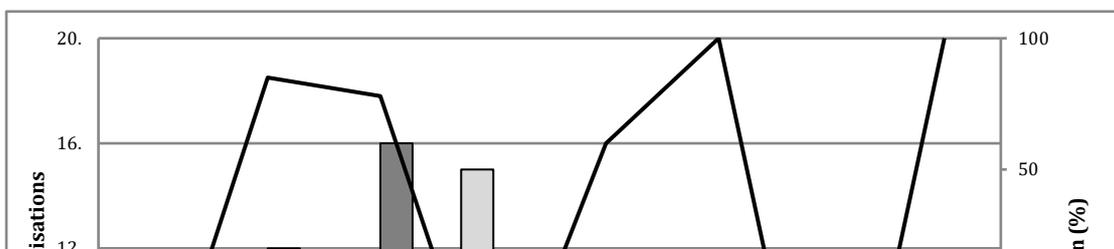


Figure 135 : Nombre et taux d'évolution d'hospitalisations des pathologies avant le pic de pollution (du 1^{er} janvier au 2 février) et après le pic de pollution (du 3 au 28 février 2009). (Source des données : archives des urgences La Rabta et ANPE)

La situation sanitaire exceptionnelle qu'ont connue les urgences La Rabta est une conséquence d'un épisode exceptionnel de pollution particulaire. Cependant, les hospitalisations pour causes respiratoires se succèdent selon plusieurs facteurs notamment la gravité des cas et l'âge. Quelles sont donc les pathologies respiratoires attribuables à la poussière ? Et quelles sont les personnes à risque ?

- Pathologies respiratoires attribuables à la poussière

La figure 134 illustre qu'après le pic de PM10 du 3 février il y a recrudescence de certaines pathologies et la baisse d'autres :

- Une augmentation du nombre d'admissions pour BPCO de 1 à 12 cas. Cette pathologie est très sensible à la pollution particulaire. Des études ont montré aussi que la fonction respiratoire diminuait lors d'une exposition chronique à long terme aux particules. En augmentant le stress oxydatif, elles aggravent l'inflammation des BPCO et conduisent à leur exacerbation (Prouvost, 2007) ;
- Une augmentation du nombre de pneumopathies de 2 à 16 admissions hospitalières. Cette pathologie est également parmi les principales maladies associées à l'inhalation de poussières dangereuses (Aubier *et al.*, 2009) ;
- Recrudescence du nombre d'hospitalisations pour embolie pulmonaire (EP) de 2 à 8 cas ;
- En ce qui concerne l'asthme, l'étude donne des résultats contrastés, c'est que le niveau d'hospitalisation a baissé de 11 à 4 cas après le pic de pollution. On ne s'en étonnera pas étant donné que l'asthme obéit à différents mécanismes et déclencheurs dont effectivement la poussière, aussi, les urgences sont limitées par les places et en cas de tension ils n'hospitalisent que les cas les plus graves. Nous pouvons dire de même pour la dyspnée avec la baisse du nombre d'hospitalisations, pour ce symptôme respiratoire, de 15 à 5 cas ;

- Après le pic de pollution, nous comptons également 3 hospitalisations pour pleurésie et un cas de pneumothorax.

- Les décès

Cette pollution aux PM10 peut causer des complications respiratoires plus graves menant au décès. En effet, 6 décès ont été enregistrés après le pic de pollution du 3 février, la première victime est décédée aux urgences La Rabta le 5 février soit deux jours après le pic de pollution, sachant qu'aucun décès n'a été enregistré avant cette date de l'année 2009. Cinq décès sur six concernent la pneumopathie et seulement un cas de dyspnée (Tab. 70).

Tableau 70 : Nombre de décès par pathologie respiratoire et par groupe d'âge aux urgences La Rabta du 1^{er} janvier au 28 février 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).

Catégorie d'âge Pathologie	0-44	45-64	65 et plus	Total
Pneumopathie	1	1	3	5
Dyspnée	1	0	0	1
Total	2	1	3	6

- Population à risque

L'exposition des personnes est très variable en fonction de leurs activités : répartition de leur temps sur le territoire (dans des secteurs directement influencés par des sources ou plus éloignés) ; entre espaces intérieurs (eux-mêmes plus ou moins influencés par la pénétration de polluants issus de l'extérieur ou par des sources intérieures) ; selon le degré d'activité physique (qui augmente la ventilation et donc la pénétration des polluants particuliers) (Prouvost, 2007). En effet, dans cette étude, les populations les plus sensibles ou à risque face aux excès de pollution aux PM10 sont les personnes âgées, c'est que 83 % des patients hospitalisés dépassent les 45 ans (Tab. 71). Pour les décès, les personnes âgées de 65 ans et plus sont les plus à risque. D'autre côté, le nombre d'hommes est légèrement plus élevé que les femmes notamment dans la catégorie d'âge 45-64 ans, nous pouvons expliquer cela par le travail de l'homme en plein air qui est plus élevé que la femme, donc il est plus exposé à la pollution extérieure.

Tableau 71 : Nombre de patients hospitalisés aux urgences La Rabta (du 3 au 28 février 2009) selon le genre et la catégorie d'âge. (Source des données : archives des urgences La Rabta).

Catégories d'âge	Genre		Total
	Femme	Homme	
0-44	5	4	9
45-64	7	13	20
65 et plus	9	11	20
Total	21	28	49

- Temps de latence entre le pic de pollution aux PM10 et le début de l'impact sanitaire

Le tableau 72 illustre le décalage entre le pic de PM10 du 3 février 2009 et le nombre d'hospitalisations admis aux urgences La Rabta. Les effets de la surconcentration des PM10 sur la santé respiratoire peuvent se présenter immédiatement le jour même comme pour la BPCO, la pneumopathie, la dyspnée et l'embolie pulmonaire (EP), alors que d'autres décalages pouvant atteindre plusieurs jours entre le pic de pollution et l'aggravation de la santé respiratoire des patients causant même le décès. Sur 44 hospitalisations, entre le 3 et le 27 février 2009, sept patients ont péri.

Tableau 72 : Décalage entre pic de pollution aux PM10 et impact sanitaire (hospitalisation ou décès « D ») du 3 au 27 février 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).

	j	j+1	J+2	J+3	J+4	J+5	J+6	J+7	J+8	J+9	J+10	J+11	J+12	J+13	J+14	J+15	J+16	J+17	J+18	J+19	J+20	J+21	J+22	J+23	J+24
Asthme				1	1			1																	
BPCO	1		1		1	1	2						2							1			2		1
Pneumopathie	1		2 D	1	1				1		1D		1		1	2D	1		2	(1D)	2				
Dyspnée	1				1				1D				1	1											
EP	1					2		2						1							1	1			

estimation des événements sanitaires évitables

Dans le but d'estimer les événements sanitaires pour causes respiratoires, nous analysons le nombre d'hospitalisations aux urgences La Rabta et les niveaux des moyennes journalières des PM10 pendant la saison froide, les niveaux de ces polluants sont plus élevés en hiver que le reste de l'année (chapitre VIII).

Le tableau suivant (Tab. 73) porte sur le nombre d'hospitalisations aux urgences La Rabta et les moyennes journalières des PM10 pendant la saison froide 2009 (décembre, janvier, février et mars) dans les stations de la qualité de l'air de Beb Alioua La Manouba, Ghazela, et Ben Arous. Ces stations présentent des mesures pendant le jour de pic du 3

février ainsi que des données peu lacunaires durant toute la saison froide de l'année 2009.

Tableau 73 : Nombre d'hospitalisations aux urgences La Rabta et niveaux des moyennes journalières des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans les stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis (Beb Alioua, La Manouba, Ghazela, et Ben Arous) de la saison froide 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta et ANPE).

	Maximum journalier des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nombre d'hospitalisations
Moyenne	72	2
Percentile 5	21	0
Percentile 25	48	0
Percentile 50	63	1
Percentile 75	90	2
Percentile 90	81	3
Percentile 95	123	5
Maximum	481	13
Minimum	17	0

- Description des indicateurs environnementaux et sanitaires

L'analyse du tableau 74 montre que :

- les niveaux moyens journaliers des PM10 dans le ciel du Grand-Tunis pendant les mois de janvier, février, mars et décembre 2009 étaient de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- les données de la morbidité étaient caractérisées par un nombre journalier moyen d'hospitalisations de cause respiratoire de 2, une moyenne supérieure à la moyenne annuelle de toute l'année 2009 qui a été de 1.

Les distributions journalières par classe des niveaux d'exposition aux PM10 dans les stations de l'ANPE dans le Grand-Tunis (Fig. 136), il en ressort que :

- les niveaux inférieurs à $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'enregistrent aucune admission hospitalière ;
- entre 60 et $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (limite du seuil tunisien, valeur limite relative à la santé) les admissions hospitalières représentent un taux d'hospitalisation de 69 %, donc au-delà de ce seuil les hospitalisations représentent 31 %.

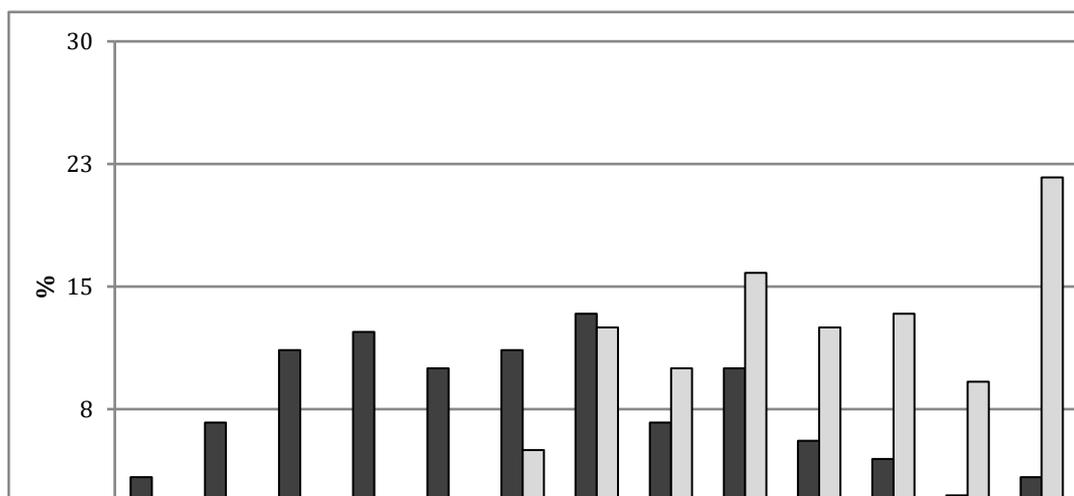


Figure 136 : Distribution par classes des niveaux d'exposition journaliers et des admissions hospitalières aux urgences La Rabta pour chaque niveau des moyennes de pollution aux PM10 pendant la saison froide dans les stations de l'ANPE (Beb Alioua, La Manouba, Ghazela et Ben Arous). (Source des données : archives des urgences La Rabta et ANPE).

- Estimation des évènements sanitaires évitables

Le nombre d'hospitalisations évitables pendant la saison froide (décembre, janvier, février et mars) a été estimé à partir des trois scénarios :

Scénario 1

Si le niveau de pollution avait été celui de 5 % des jours les moins pollués ($21 \mu\text{g}/\text{m}^3$) on aurait évité 114 hospitalisations.

Scénario 2

Si le niveau moyen d'exposition pendant ces 4 mois ($72 \mu\text{g}/\text{m}^3$) était ramené à $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (réduction de 25 %), on éviterait 58 consultations.

Scénario 3

Si les niveaux d'exposition des jours les plus pollués (P75 : $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) étaient ramenés à P25 ($48 \mu\text{g}/\text{m}^3$) niveaux les moins pollués, le nombre de consultations évitées serait de 93.

XI. 7. 3. Etablissement des valeurs guides de la qualité de l'air en PM10

L'analyse des indicateurs environnementaux et sanitaires nous a permis de conclure qu'il y'a une association significative entre concentration de PM10 et hospitalisations pour causes respiratoires observée aux urgences La Rabta après le passage d'une tempête de sable sur le Grand-Tunis. En effet, cet épisode a servi de modèle pour quantifier la pollution aux PM10 et admissions pour pathologies respiratoires.

Après la quantification du risque des admissions hospitalières, nous pouvons déduire des normes réalistes pour la qualité de l'air basée sur la concentration des PM10. Cet indice, applicable au Grand-Tunis et à toutes les villes tunisiennes, varie sur une échelle allant de 1 à 10 (Très bon à Très mauvais) (Tableau 74). Les indices de 1 à 4, inférieures à $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sont excellents à assez bons ; les indices de 5 à 7, allant de 90 à $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sont moyens à très médiocres et les indices de 8 à 10, allant de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et plus, sont très mauvais à exécration pour la santé respiratoire.

Tableau 74 : Niveau de l'indice de la qualité de l'air en PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le Grand-Tunis

Sous-indice	Classe	Seuils de PM10
1	Excellent	0 - 60
2	Très bon	60 - 70
3	Bon	70 - 80
4	Assez bon	80 - 90
5	Moyen	90 - 100
6	Médiocre	100 - 110
7	Très médiocre	110 - 120
8	Mauvais	120 - 130
9	Très mauvais	130 - 140
10	Exécrable	> 140

XI. 8. TYPES DE TEMPS DES JOURS DE PICS DES ADMISSIONS HOSPITALIERES

Dans ce qui suit, nous étudierons les caractéristiques climatiques et les types de temps des jours de pics des hospitalisations pour pathologies respiratoires aux urgences La Rabta, selon les résultats des indicateurs biométéorologiques pour chaque saison.

Nous analysons le jour qui a enregistré le plus grand nombre d'admissions hospitalières pour chaque saison climatique.

XI. 8. 1. Temps perturbé associé à une pollution particulaire pendant la saison froide

Pendant la saison froide (décembre, janvier, février et mars), l'épisode du 3 au 5 janvier 2009, a été exceptionnel par le nombre de jours de pics (3 jours), mais aussi par le nombre d'admissions pour pathologies respiratoires aux urgences La Rabta (23 patients). Cet épisode a connu le plus grand nombre d'admissions hospitalières de toute la période d'étude (année 2009), soit 13 admissions en une seule journée (le 5 janvier), sachant que la moyenne journalière des admissions aux urgences La Rabta, pendant cette saison hivernale, a été de deux admissions seulement. Nous pouvons distinguer deux types de paroxysmes météorologiques durant cet épisode :

- un paroxysme météorologique à deux composants, thermique et hygrométrique, le 2 janvier : avec un dépassement des seuils thermiques et hygrométriques le jour précédent le jour de pic du 3 janvier ;
- un paroxysme météorologique à un seul composant, le 4 et le 5 janvier succédant à un dépassement du seuil hygrométrique maximal, le jour de pic même pour le 4 janvier, et le jour précédent pour le 5 janvier.

L'analyse des caractéristiques météorologiques extrêmes de cet épisode nous permet de déduire que :

- le 2 janvier, la température nocturne a été en dessous des seuils théoriques optimaux : avec 8°C pour la température nocturne et 20°C pour la température diurne. L'humidité relative maximale a dépassé les seuils hygrométriques optimaux avec une valeur de 93 % et l'humidité relative minimale avec une valeur de 43 %. Une nette élévation de la température minimale, le jour de pic du 3 janvier (10°C), a été accompagnée d'une légère baisse de la température maximale (16°C) (Fig. 137).

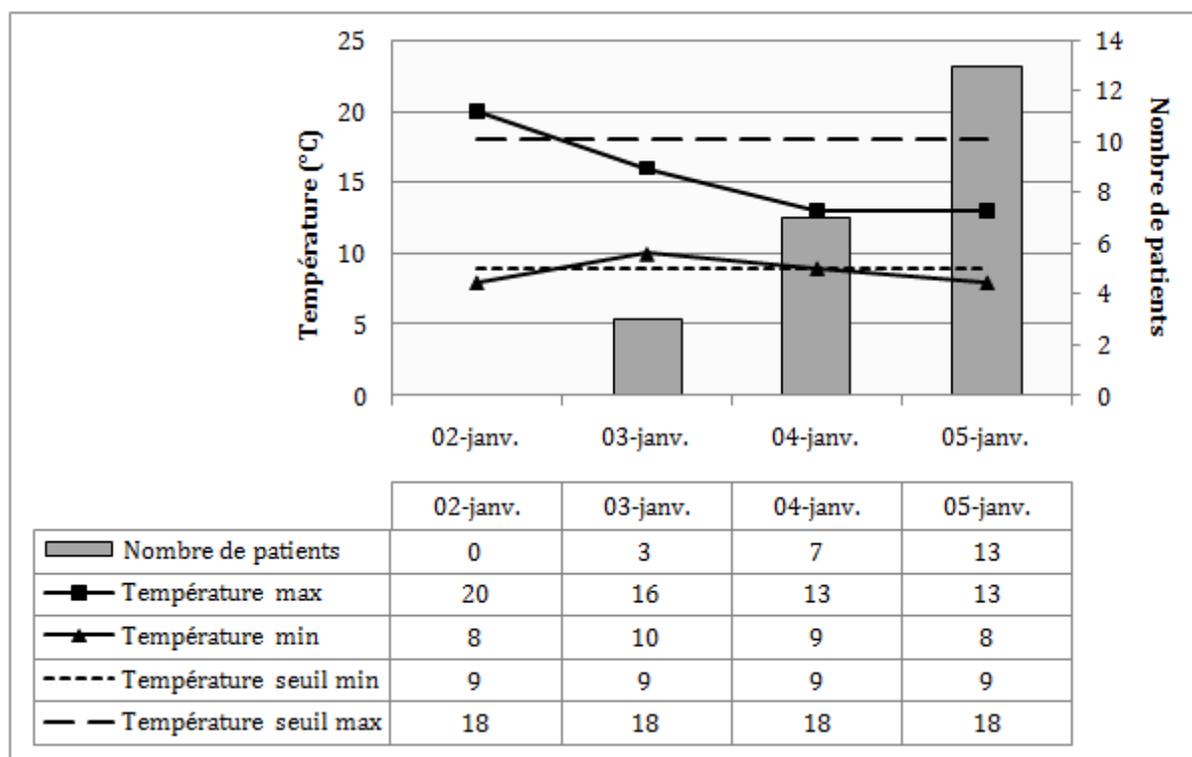


Figure 137 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et des températures (minimale et maximale) (en °C) pendant l'épisode du 3-5 janvier 2009 (jours de pics et le jour précédent). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

La plus ample fluctuation thermique pendant les deux jours a été observée le 2 janvier entre 16h et 19h avec une baisse de 6°C (Tab. 75).

Tableau 75 : Les fluctuations thermiques (°C) tri-horaires durant l'épisode 3-5 janvier 2009. (Source des données : INM).

Date	2 janvier	3 janvier	4 janvier	5 janvier
Période tri-horaire				
1h-4h	-2	-1	-2	-1
4h-7h	-1	-1	0	-1
7h-10h	+2	+1	0	-1

10h-13h	+4	+2	+2	0
13h-16h	+3	0	0	0
16h-19h	-6	-2	-1	-1
19h-22h	0	0	-1	-1

Concernant l'humidité relative, elle a été à la norme le jour de pic (le 3 janvier) avec une minimale de 63 % et une maximale de 88 %. Rien que, le 2 janvier, elle a dépassé légèrement les seuils optimaux minimal et maximal avec respectivement, 46 % et 93 % (Fig. 138).

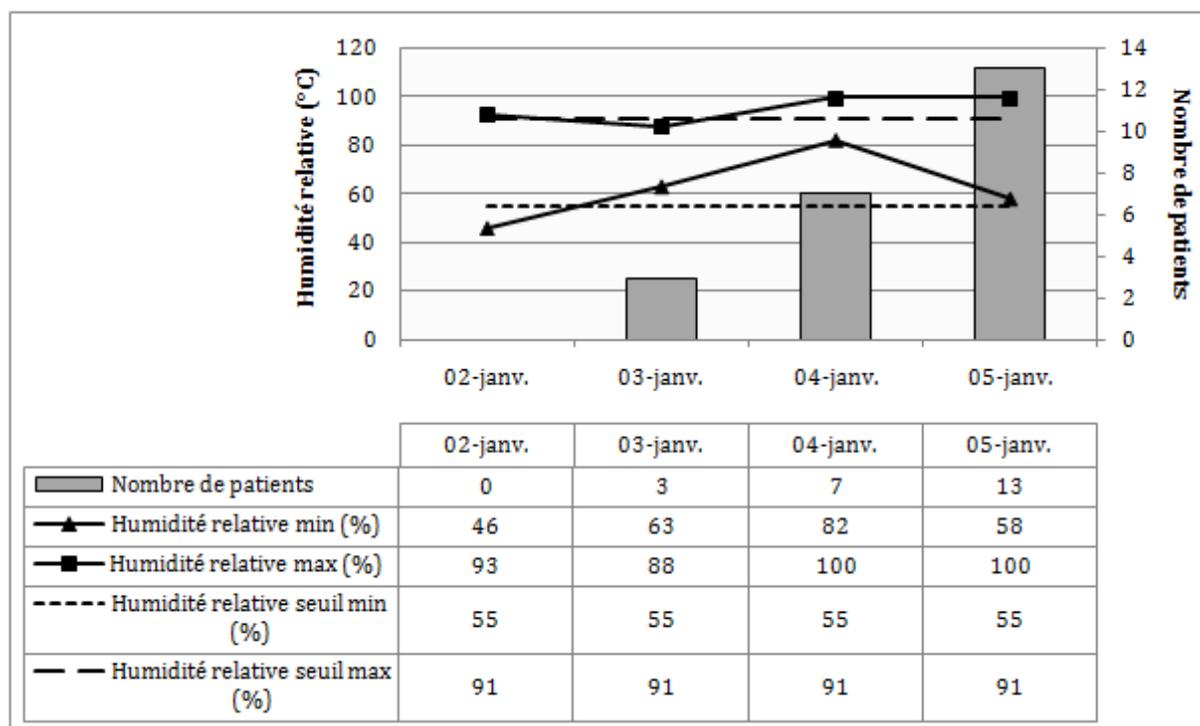


Figure 138 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et de l'humidité relative (minimale et maximale) (en %) pendant l'épisode du 3-5 janvier 2009 (jours de pics et jour précédent). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Les fluctuations hygrométriques tri-horaires pendant ces deux journées sont présentées dans le tableau 76. La plus large fluctuation hygrométrique a été une augmentation de 10 % la veille du pic des admissions hospitalières, le 2 janvier, enregistrée entre 19h et 22h.

Tableau 76 : Les fluctuations hygrométriques (%) tri-horaires durant l'épisode 3-5 janvier 2009. (Source des données : INM).

Date	2 janvier	3 janvier	4 janvier	5 janvier
Période tri-horaire				
1h-4h	+1	+6	+5	+6

4h-7h	-5	0	+6	-6
7h-10h	-10	-6	-6	-5
10h-13h	-4	-4	-6	0
13h-16h	-3	+5	+6	+4
16h-19h	+9	-5	+6	+9
19h-22h	+10	+5	+6	+6

Durant cet épisode, le vent a franchi les 6 m/s (seuil limite de tolérance) pour atteindre un maximum de 9 m/s le 5 janvier (Fig. 139).

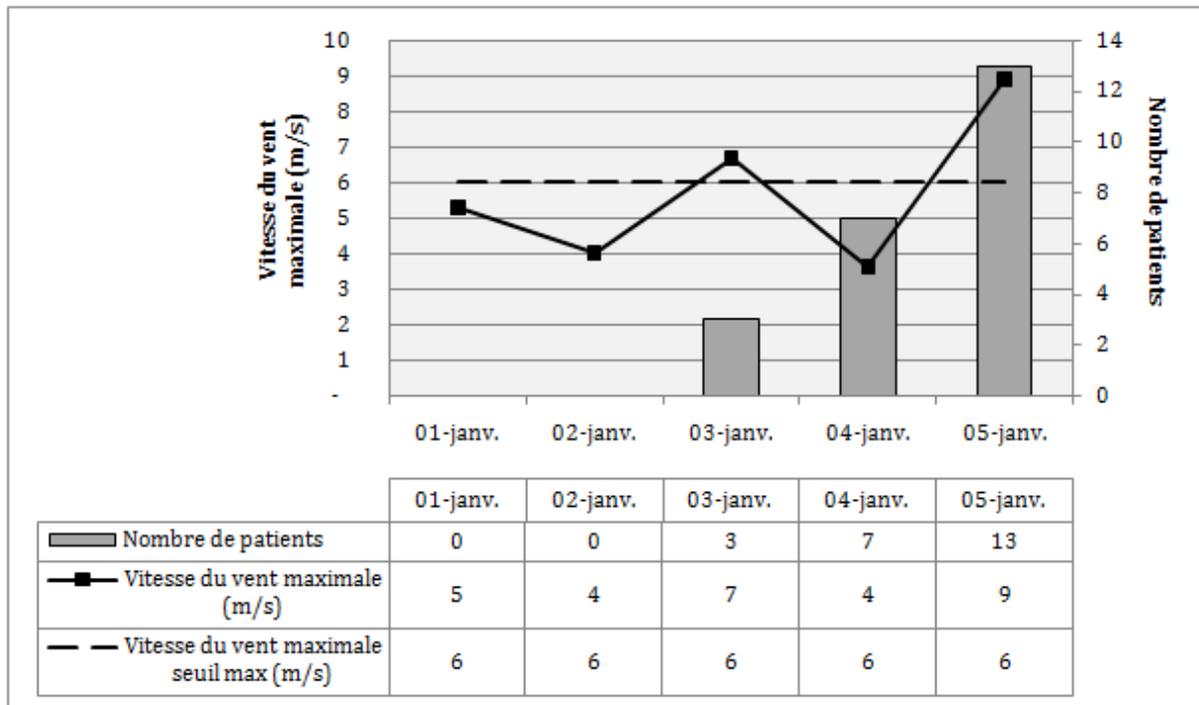


Figure 139 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et la vitesse maximale du vent (en m/s) pendant l'épisode du 3-5 janvier 2009 (jours de pics et les deux jours précédents). (Source des données : INM et urgences La Rabta).

Le 3 janvier 60 % des vitesses du vent ont été modérée (2 à 4 m/s) avec une direction dominante de SSE et 40 % de vent assez fort (5 à 7 m/s), selon la classification des vitesses du vent de Météo-France, avec une direction dominante de WSW. Le 5 janvier, le vent assez fort a été plus présent avec 67 % du total des vitesses, le vent modéré a été de 29 % et le vent fort (8 à 11 m/s) a été présent avec 8 % des cas (Fig. 140).

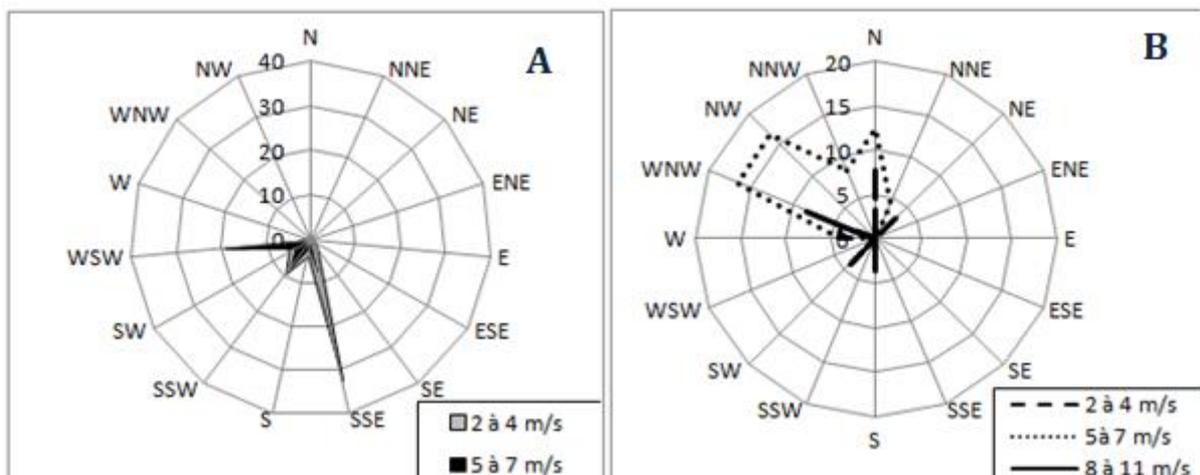


Figure 140 : Roses de vent horaire selon le pourcentage de la vitesse (en m/s) du 3 (A) et du 5 janvier 2009 (B) à la station INM de Tunis-Carthage. (Source des données : Weather Underground).

L'analyse de la qualité de l'air du 1^{er} au 5 janvier 2009 montre que durant les jours qui ont enregistré des admissions hospitalières aux urgences La Rabta, ont été du niveau « bon » à « excellent » dans les stations de l'ANPE qui présentent des mesures de PM10 pendant la période d'étude (Ben Arous, La Manouba, Beb Saadoun, Ghazela et Beb Alioua), avec des valeurs variant entre 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ghazela, le 5 janvier) et 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (La Manouba, le 3 janvier). Tandis que, les deux jours précédents, les niveaux des PM10 ont été moyens (entre 97 et 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Beb Saadoun, Ben Arous et Ghazela) voire exécrables ($> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durant le 1^{er} et le 2 janvier (Fig. 141).

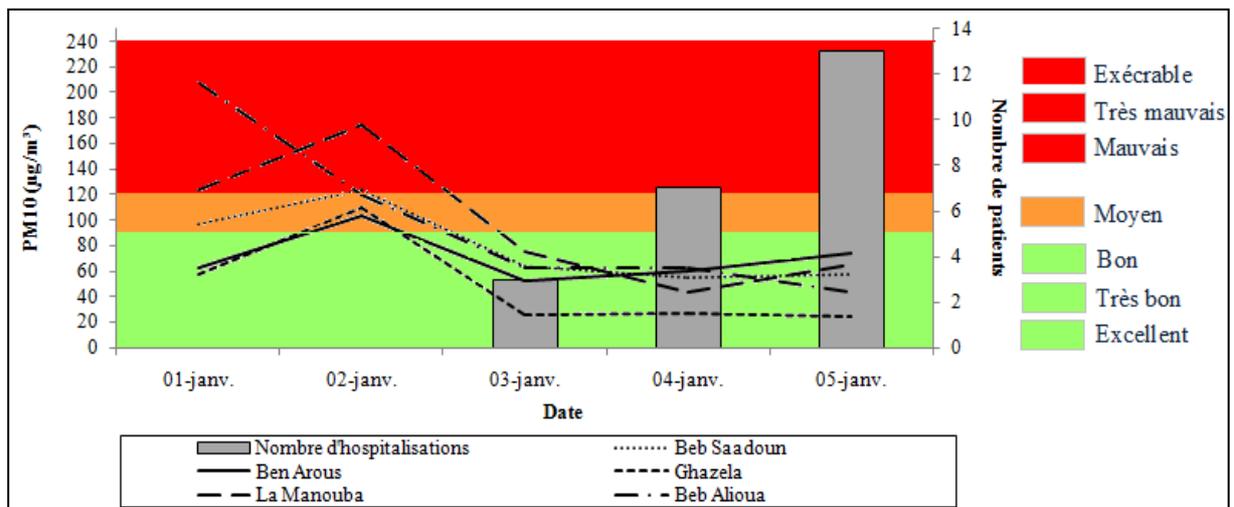


Figure 141 : Taux de PM10 dans les stations de l'ANPE (Ben Arous, La Manouba, Beb Saadoun, Ghazela et Beb Alioua) (ANPE) et nombre d'admissions hospitalières aux urgences La Rabta (archives des urgences La Rabta) du 1^{er} janvier au 5 janvier 2009.

La situation atmosphérique se caractérise par l'installation d'une cellule cyclonique détachée de la dépression d'Islande sur la Méditerranée. La pression au sol est d'environ 1010 hPa le 3 janvier 2009. Le contact entre les masses d'air froid d'origine polaire et les masses d'air chaud d'origine tropicale (Fig. 142).

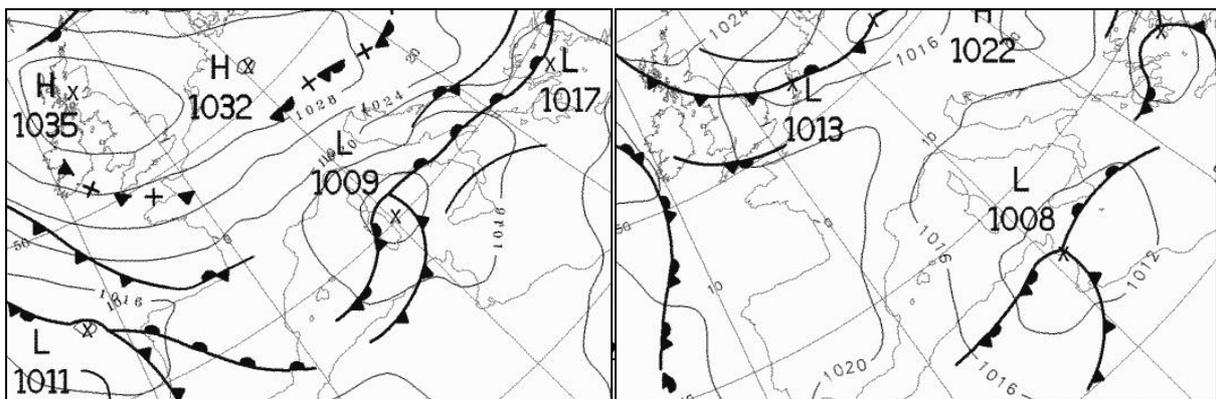


Figure 142 : Pression atmosphérique au sol (en hPa) à minuit (TU) le 3 et le 5 janvier 2009. (Source : Wetterzentrale).

C'est une agression climatique manifestée essentiellement par le dépassement des seuils de tolérance thermique, hygrométrique et anémométrique. La qualité de l'air peut être aussi, un facteur à ne pas négliger notamment avec le niveau moyen voire exécrable des PM10 enregistré dans certaines stations de l'ANPE, le 2 janvier 2009.

En conséquence, ces conditions météorologiques et la qualité de l'air sur le Grand-Tunis, ont poussé trois hommes à se rendre aux urgences, le 3 janvier, pour la première hospitalisation et l'unique fois en 2009 pour eux. La situation a été très grave pour les trois patients : un patient de 61 ans atteint d'une embolie pulmonaire a été envoyé au service de réanimation (REA), le deuxième déjà atteint d'un BPCO, âgé de 63 ans a dû passé 5 jours aux urgences pour sortir le 7 janvier puis rentrer chez lui. Le troisième patient est un octogénaire, il a été hospitalisé pour 4 jours pour une dyspnée (sortie le 6 janvier).

Nous pouvons constater, tel que l'on avait déduit à la section précédente, que l'effet de la température, de l'humidité relative apparaît habituellement entre 24 et 48 heures du dépassement des seuils de tolérance, ce qui montre l'importance d'un froid persistant et d'une forte humidité persistante, d'une part, aussi d'autre part dans la genèse d'une suradmission aux urgences pour pathologie respiratoire, en plus d'une latence de l'apparition de celle-ci. La qualité de l'air peut être aussi un facteur à ne pas négliger.

VI. 8. 2. Temps anticyclonique avec une variation marquée de l'humidité relative de l'air

Le 18 juin 2009 est le jour qui a enregistré le plus grand nombre d'admissions hospitalières pour pathologies respiratoires aux urgences La Rabta pendant la saison chaude avec 5 admissions. Ce jour de pic succède à un stress climatique extrême double, thermique et hygrométrique.

Le seuil limite de tolérance pour la température minimale pendant la saison chaude fixée, par l'indicateur (C1, C2) fixé à 24°C, a été dépassé avec une valeur de 17°C. Quant à la chaleur diurne, elle a été aux normes avec une valeur de 33°C.

La plus ample fluctuation thermique tri-horaire le 18 juin a été de 4°C : une hausse de 4°C entre 7h et 10h et une baisse de la même amplitude entre 19h et 22h (Tab. 77). Cette fluctuation reste très loin du seuil pathogénique de 12°C fixé par Rivolier (1972).

Tableau 77 : Les fluctuations thermiques (°C) tri-horaires le 18 juin 2009. (Source des données : INM).

Date	18 juin 2009
Période tri-horaire	

1h-4h	- 2
4h-7h	2
7h-10h	4
10h-13h	2
13h-16h	0
16h-19h	- 2
19h-22h	- 4

L'humidité relative n'a été aux normes, par rapport au seuil hygrométrique fixé par l'indicateur (C1', C2' : Hmin > 35 % et Hmax > 87 %), que le 18 juin (Fig. 143).

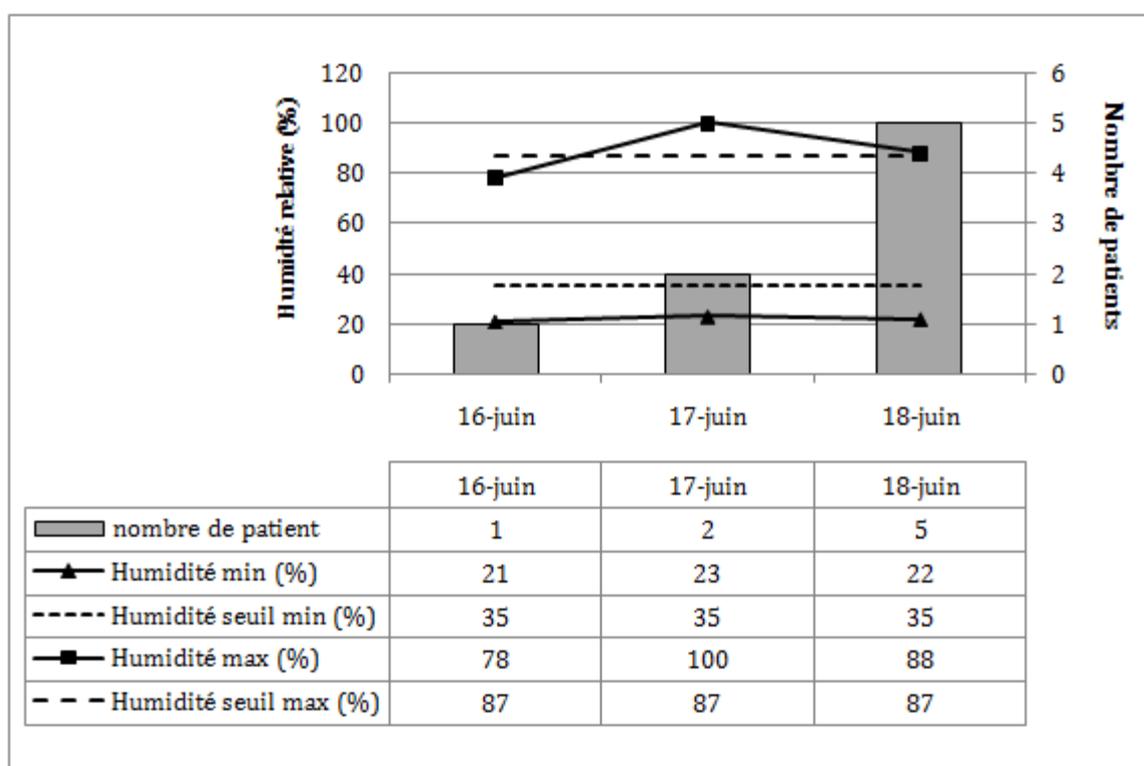


Figure 143 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et de l'humidité relative (minimale et maximale) (en %) du 16 au 18 juin 2009 (jours de pics et les deux jours précédents). (Source des données : INM et urgences La Rabta).

À la faveur d'une situation anticyclonique et des masses d'air chaudes et humides, la station INM de Tunis Carthage a enregistré un changement drastique de l'humidité. Le 17 et le 18 juin 2009, l'amplitude tri-horaire a atteint - 25 % (le 17 juin) et 23 % (le 18 juin) (Tab. 78). Cette variation brusque de l'humidité relative a été accompagnée par un changement de la température. Le temps a été chaud et sec la journée et doux et humide le soir et les premières heures du matin.

Tableau 78 : Les fluctuations hygrométriques (%) tri-horaires du 16 au 18 2009. (Source des données : INM).

Date	16 juin	17 juin	18 juin
Période tri-horaire			
1h-4h	- 3	5	5
4h-7h	10	12	6
7h-10h	- 10	- 25	- 5
10h-13h	2	- 16	- 20
13h-16h	- 10	12	- 5
16h-19h	9	- 9	8
19h-22h	17	17	23

Du 16 au 18 juin, un temps anticyclonique règne sur la Tunisie (Fig. 144) lié à une baisse marquée de l'humidité relative.

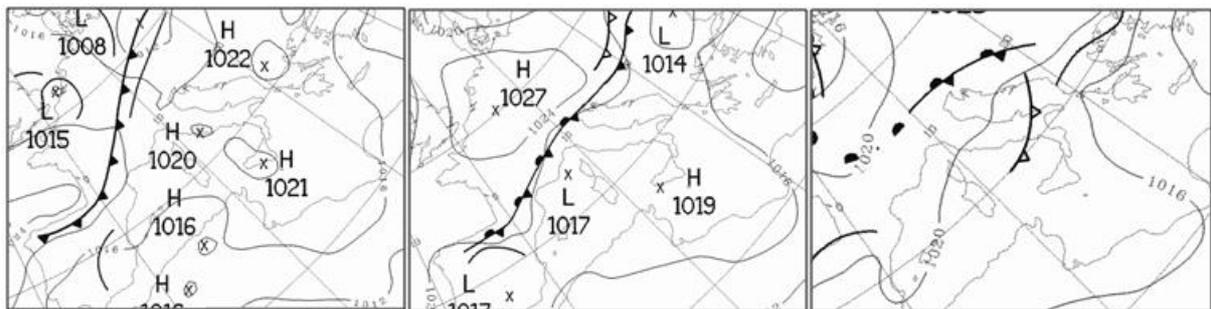


Figure 144 : Pression atmosphérique au sol (en hPa) à minuit (TU) du 16 au 18 juin 2009. (Source : Wetterzentrale).

Ces conditions météorologiques ont été la cause d'une recrudescence du nombre des patients admis aux urgences de La Rabta le 18 juin avec un nombre de 5 admissions, 4 femmes et un homme. Admis pour 3 pneumopathie (3 cas), pneumothorax (un seul cas) et dyspnée (un seul cas).

VI. 8. 3. Saison intermédiaire

Pendant la saison intermédiaire (avril, mai, octobre et novembre), le plus grand nombre d'admissions pour causes respiratoires a été de 6 admissions enregistrées le 14 mai 2009.

Ce jour de pic a été lié à un stress climatique extrême simple manifesté par un léger dépassement du seuil thermique extrême minimal et maximal fixé par l'indicateur (C1', C2' : $T_{min} > 18^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$) : la température minimale a été de 17°C et la température maximale a été de 26°C le 13 mai, soit un jour avant le jour de pic (Fig. 145).

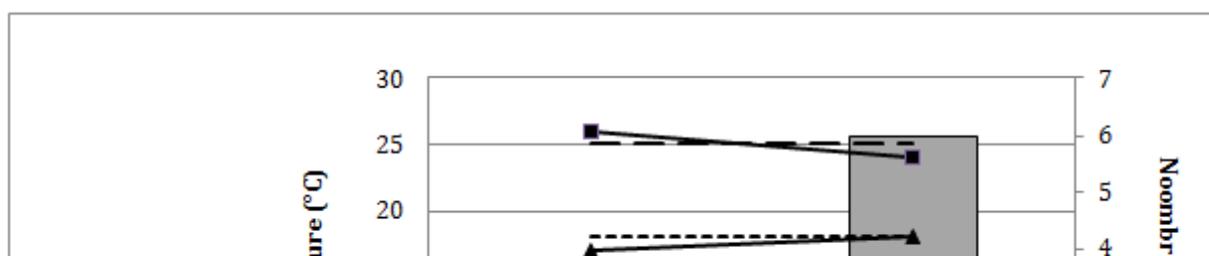


Figure 145 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et des températures (minimale et maximale) (en °C) le 13 et 14 mai 2009 (jours de pics et le jour précédent) (source des données : INM et urgences La Rabta).

Tableau 79 : Les fluctuations thermiques(%) tri-horaires du 13 et 14 mai 2009. (Source des données : INM).

Date	13 mai	14 mai
Période tri-horaire		
1h-4h	- 1	0
4h-7h	1	0

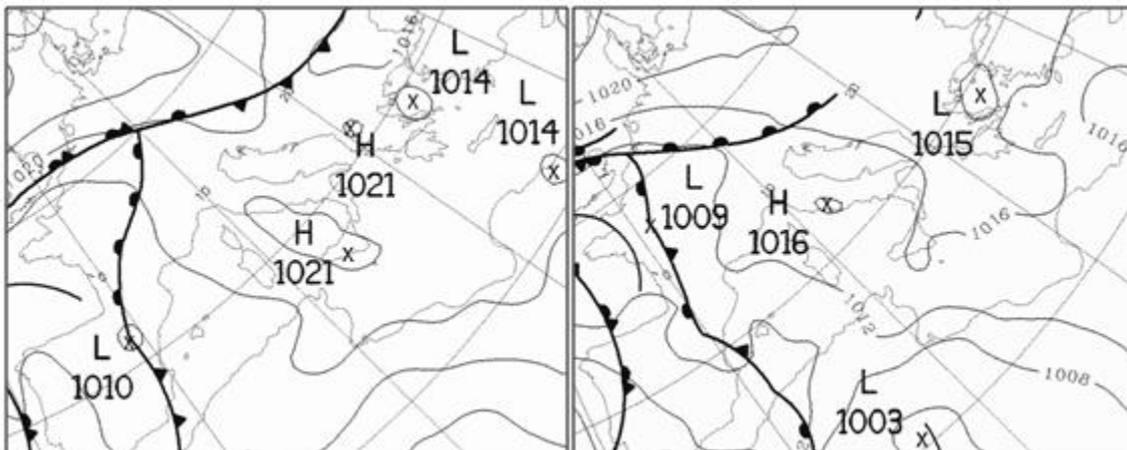


Figure 146 : Pression atmosphérique au sol (en hPa) à minuit (TU) du 16 au 18 juin 2009. (Source : Wetterzentrale).

CONCLUSION

Ce chapitre révèle que les maladies respiratoires sont dues à la fois à des facteurs personnels et à des facteurs environnementaux. Ainsi, l'âge, le genre, les infections, l'exposition aux allergènes, les polluants atmosphériques et le tabac joueraient un rôle clé dans leur genèse :

- la prévalence des maladies respiratoires est largement plus élevée chez les hommes et augmente avec l'âge. Les hommes représentent 64 % des hospitalisations contre 36 % chez les femmes. Les sujets de 65 ans et plus sont les plus vulnérables aux maladies respiratoires et au décès avec 43 % du total des hospitalisations et 66 % du total des décès ;

- la pneumopathie, l'embolie pulmonaire et la BPCO représentent une cause majeure de morbidité et de mortalité pour causes respiratoire.

Il en ressort aussi, que les jours de pic des admissions hospitalières (fixés à 3 admissions et plus) ont varié selon des indicateurs et des seuils de tolérance bien spécifiques à chaque saison :

- Pendant la saison froide (décembre, janvier, février et mars) :

$T_{min2j} > 9^{\circ}\text{C}$ et $T_{max2j} > 18^{\circ}\text{C}$;

$H_{min2j} > 55\%$ et $H_{max2j} > 91\%$;

$V_{max3j} > 6\text{m/s}$.

- Pendant la saison estivale (juin, juillet, août et septembre) :

$T_{min} > 24^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 35^{\circ}\text{C}$;

$H_{min3j} > 35\%$ et $H_{max3j} > 87\%$;

$V_{max} > 6\text{m/s}$.

- Pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril et mai) :

$T_{min} > 18^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$;

$H_{min2j} > 55\%$ et $H_{max2j} > 88\%$;

$V_{max} > 7\text{m/s}$.

Le risque climatique susceptible de causer de grandes répercussions sur la santé respiratoire dans le Grand-Tunis pourrait être lié essentiellement à :

- un type de temps perturbé associé à une pollution particulaire pendant la saison froide ;

- pendant la saison chaude, c'est plutôt un temps anticyclonique chaud avec une variation marquée de l'humidité relative de l'air.

Chapitre XII : Crises d'asthme : climat, type de temps et pollution de l'air

L'asthme constitue un important problème mondial avec environ 150 millions d'individus atteints dans le Monde. Selon l'OMS (2014), la prévalence de l'asthme est en augmentation dans la majorité des pays et plus de 180 000 décès par an ont été enregistrés pour cette affection. C'est le cas en Tunisie, où l'asthme est un problème de santé publique. Selon le Ministère de la Santé publique (2012), cette maladie touche près de 4 % de la population tunisienne.

Nous avons réalisé une étude épidémiologique sur l'asthme dans l'Unité d'Observation de Courte Durée (UOCD) du service des urgences de l'hôpital régional de « Ben Arous ». C'est une étude prospective sur « les caractéristiques épidémiologiques et bioclimatiques des crises d'asthme ». L'étude a débuté le 1^{er} juin et s'est terminée le 31 décembre 2011. Elle a intégré un questionnaire concernant les données démographiques, les antécédents et les habitudes de l'asthmatique, les caractéristiques évolutives de sa maladie, l'état de contrôle de celle-ci les 4 semaines précédentes et les données se rapportant à l'exacerbation aiguë actuelle.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'effet du temps sur le déclenchement des crises d'asthme pour cela nous allons mettre en évidence l'humidité relative, la température, la vitesse et la direction du vent avec les admissions quotidiennes des crises d'asthme aux UOCD. Nous chercherons aussi, des indicateurs biométéorologiques caractéristiques pour cette pathologie. Notre objectif est aussi d'étudier l'effet de la pollution photochimique sur les admissions quotidiennes des crises d'asthme. Nous allons étudier l'impact de la pollution photochimique sur la santé respiratoire à la ville de Ben Arous.

XII. 1. LES CRISES D'ASTHME : CARACTERISTIQUES ET FACTEURS

L'asthme est une maladie multifactorielle qui peut résulter à la fois de facteurs génétiques et infectieux, mais aussi de facteurs environnementaux. Quels sont donc ces facteurs en cause des crises d'asthme et quelles sont les caractéristiques démographiques des patients admis aux urgences de Ben Arous ? Quelles sont les causes de leurs crises ?

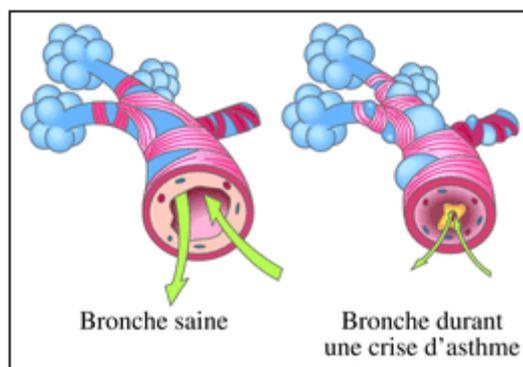
XII. 1. 1. Définition de la crise d'asthme et caractéristiques démographiques des patients

La crise d'asthme est la manifestation la plus fréquente de la maladie asthmatique. Une crise d'asthme est de brève durée, généralement de quelques heures ou jours, variant en gravité et en fréquence d'une personne à l'autre (OMS, 2014). L'enchaînement de crises d'asthme sur une période de quelques jours définit une exacerbation.

La crise d'asthme est caractérisée par une contraction importante des bronches. De plus, la réponse inflammatoire due à la réaction allergique provoque une hypersécrétion de

mucus qui obstrue les bronches et ne laisse plus passer que peu d'air (Anthonot, 2012) (Fig. 147).

Figure 147 : Comparaison entre une bronche saine et une bronche durant une crise d'asthme. (Source : www.lookfordiagnosis.com).



Le recours à une consultation pour asthme notamment aigu constitue un événement d'une grande importance : elle impose une prise en charge immédiate, efficace, mais elle témoigne également de la gravité potentielle de l'asthme (Salmeron *et al.*, 2001).

Dans cette étude, 230 patients ont été admis à l'UOCD. L'âge médian des patients est de 37 ans et les extrêmes sont entre 18 et 70 ans.

Les femmes représentent 63 % des asthmatiques contre 37 % pour les hommes. Cette prédominance féminine est maintenue lorsque nous considérons séparément différentes tranches d'âges pour les moins de 60 ans, ce qui illustre la vulnérabilité du genre féminin durant la période d'activité. Les femmes adultes souffrent plus souvent d'asthme que les hommes pour des raisons anatomiques et hormonales (Shaaban *et al.*, 2008).

XII. 1. 2. Les facteurs de déclenchement des crises d'asthme

L'asthme est une maladie d'origine génétique, mais selon les patients, les crises peuvent être déclenchées par plusieurs facteurs :

- Les allergènes respiratoires présents dans l'air ambiant, qui peuvent déclencher des symptômes d'asthme en arrivant au niveau des bronches. Les allergènes les plus souvent incriminés sont les pneumallergènes (acariens, pollens, phanères animales, blattes, moisissures) ;
- Le tabagisme passif ou actif : le tabac est formellement déconseillé pour les asthmatiques, car la fumée contient de nombreuses substances irritantes qui aggravent la maladie ;
- Les facteurs psychologiques, notamment, l'anxiété, la dépression ainsi que les stress émotionnels aigus de la vie quotidienne ;
- L'atteinte des voies aériennes supérieures, notamment la rhinite et la rhinosinusite chronique qui sont très fréquentes chez les asthmatiques ;
- L'environnement professionnel : certaines professions sont susceptibles d'exposer à des irritants ou à des allergènes susceptibles d'induire ou d'aggraver un asthme. Les six métiers les plus exposés aux risques d'asthme professionnels sont : boulangers, coiffeurs, métiers de santé, peintres, travailleurs de bois et agents d'entretiens ; (Asthma. Ca, 2014) ;
- Les facteurs climatiques : il existe une relation directe ou indirecte entre les conditions atmosphériques et l'asthme. En effet, les conditions climatiques influencent les

allergènes qui peuvent aggraver les symptômes d'asthme notamment l'asthme lié à l'allergie, qui est un état de grande sensibilité à certaines particules de l'environnement. En effet, les conditions climatiques contrôlent le développement de tel ou tel allergène. Ils peuvent favoriser ou retarder la croissance des moisissures, car les spores de ces derniers dépendent des conditions climatiques pour s'accroître et se disperser. Ces facteurs peuvent être la température, les chutes de pluie, le taux d'humidité, l'intensité de la lumière du soleil et l'obscurité, les vents dominants et les facteurs climatiques saisonniers. La concentration de spores augmente avec l'augmentation du débit d'air et la chute du taux d'humidité. Les températures chaudes et venteuses favorisent la formation de moisissure. Le pollen aussi se libère et se disperse selon certains facteurs atmosphériques, tels que la température, la vitesse du vent, le taux d'humidité et les conditions météorologiques. Les ouragans, les éclairs et la pluie peuvent aussi avoir un impact important sur les niveaux de pollen et ils peuvent être reliés aux épidémies d'asthme. Le changement de pression barométrique à cause des pluies abondantes peut non seulement égrener les graines de pollen, mais aussi augmenter la concentration des agents allergènes du pollen qui pénètrent facilement les voies respiratoires et déclencher l'asthme (Besancenot, 1998 ; www.Asthma.Ca, 2014) ;

- La pollution est impliquée dans l'augmentation de la fréquence des crises d'asthme. Toutefois, le mode d'action des polluants atmosphériques est mal compris. Ils interviendraient comme un facteur aggravant chez les personnes allergiques, provoquant notamment une multiplication des crises d'asthme, et pourraient, dans certains cas, provoquer une sensibilisation chez les individus possédant déjà un terrain atopique ;

D'autres facteurs peuvent être aussi l'origine d'un déclenchement des crises d'asthme notamment l'allergie alimentaire associée à l'asthme, l'obésité, certains médicaments dits « bêtabloquants » et les antibiotiques de la famille de la pénicilline. (Afrite *et al.*, 2008 Du Pasquier *et al.*, 2004).

XII. 1. 3. Les niveaux de sévérité de l'asthme

Le recours aux urgences constitue un indicateur des crises d'asthme les plus graves. En effet, la sévérité de l'asthme est très différente d'une personne à l'autre. En fonction de la fréquence des symptômes et de la valeur des mesures du souffle (le débit expiratoire de pointe), quatre stades d'asthme sont définis :

- **Stade 1** : l'asthme est dit intermittent s'il y'a moins d'une crise d'asthme par semaine (crises brèves et absence de symptômes entre les crises). La fonction respiratoire est normale ;

- **Stade 2** : l'asthme est dit « persistant léger » s'il y a plusieurs crises d'asthme par semaine (mais pas plusieurs par jour) et si les crises peuvent perturber l'activité physique et le sommeil ;

- **Stade 3** : l'asthme est dit « persistant modéré » s'il y a au moins un symptôme d'asthme par jour ou des réveils la nuit assez fréquente (au moins une fois par semaine), si l'usage des bronchodilatateurs d'action rapide (traitement de crise) est quotidien ou si les crises affectent la qualité de vie ;

- **Stade 4** : l'asthme est dit « persistant sévère » si les symptômes sont fréquents ou permanents, les crises fréquentes, l'activité physique limitée, les réveils nocturnes habituels : la qualité de vie en est souvent affectée (www.axaprevetion.fr).

Dans notre étude la crise a été sévère chez 50,4 % soient 116 patients, modérée dans 41,7 % des cas (96 patients) et jugée légère chez 7,8 % des cas (18 patients).

Après l'examen médical, 80,9 % des asthmatiques sont retournés chez eux (186 patients) le jour même, 17,8 % (41 patients) ont été hospitalisés en UOCD et enfin 1,3 % (3 patients) hospitalisés en médecine.

En vue de ces données, environ la moitié des crises n'était pas sévères, les urgences de Ben Arous, semblent représenter pour une partie de la population l'unique accès aux dispositifs de soins.

XII. 1. 4. Evaluation du contrôle de l'asthme

Pour un patient asthmatique, l'objectif essentiel est le contrôle de sa maladie afin de pouvoir vivre sainement. Il est important donc, de déterminer la gravité de l'asthme pour déterminer la prise en charge. Le contrôle est de préférence sur une période de quatre semaines, et cela doit être suivi par le professionnel de santé. En effet, le niveau de contrôle de l'asthme et le traitement actuel, suivi par le patient, déterminent la sélection du traitement pharmacologique. Par exemple, si l'asthme n'est pas contrôlé avec un schéma thérapeutique en cours, le traitement doit être intensifié jusqu'à l'obtention du contrôle. Si le contrôle a été maintenu pendant au moins trois mois, le traitement peut être réduit afin d'établir la modalité et la posologie minimales permettant de maintenir le contrôle. Cependant, l'absence de contrôle de la maladie représente un principal facteur de risque des crises et d'hospitalisation (Du Pasquier et al., 2004 ; www.ginasthma.org).

22,2 % des asthmatiques (51 cas) dans cette étude, sont non contrôlés les 4 dernières semaines, contre 47 % contrôlés (108 cas) et 30,9 % partiellement contrôlés (71 cas).

XII. 1. 5. Habitudes des patients et ancienneté de la maladie

Malgré les effets du tabac sur l'asthmatique, la notion de tabagisme a été notée chez 133 patients (57 %) : tabagisme actif chez 48 patients (dont 22 contrôlés, 26 mal contrôlés) et tabagisme passif chez 85 patients (44 contrôlés, 41 mal contrôlés).

L'ancienneté de l'asthme datait de plus de 5 ans chez 61,3% des patients dont 58,15 % chez les mal contrôlés. 66,5 % des patients recevaient un traitement de fond (40 % contrôlés, 60 % mal contrôlés). 64 patients (27,8 %) ont des antécédents d'hospitalisation dont 41 la maladie asthmatique est mal contrôlée. La dernière consultation aux urgences datait de plus d'un mois chez 152 patients (66,1 %).

XII. 1. 6. Les causes génétiques de l'asthme

Une évidence dans la médecine : l'asthme a des causes génétiques. Les enfants héritaient de leurs parents une tendance à l'inflammation des voies respiratoires, principale gène associée à l'asthme (www.Traitements-asthme.com). Dans notre étude 49 % des asthmatiques (113 cas) ont un antécédent de pathologie pulmonaire dans la famille.

XII. 2. LES FACTEURS DE DECLENCHEMENT DES CRISES D'ASTHME DES CONSULTANTS AUX URGENCES DE BEN AROUS

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux facteurs de déclenchement des crises d'asthme qui ont nécessité une consultation aux urgences.

D'habitude, à l'arrivée aux urgences, le personnel hospitalier pose des questions au patient sur son asthme pour gérer au mieux l'admission. Nous avons posé des questions directes aux patients sur les déclencheurs susceptibles d'être la cause de l'exacerbation actuelle. Les résultats dévoilent que les facteurs sont essentiellement dominés par les épisodes infectieux pulmonaires dans 37,4 % des cas, l'exposition à un allergène dans 28,5 % des cas et à cause des paramètres météorologiques dans 20,1 % des cas. Pour les asthmatiques qui ont affirmé que la crise a été liée à l'exposition à un allergène, 49 % ont été exposés à la poussière, 26 % de la pollution automobile, 13 % de la pollution industrielle, 12 % au pollen. Quant aux paramètres météorologiques, 42 asthmatiques pensent que le froid est le facteur déclencheur de leurs crises contre un seul asthmatique se plaint de la chaleur (Fig. 148).

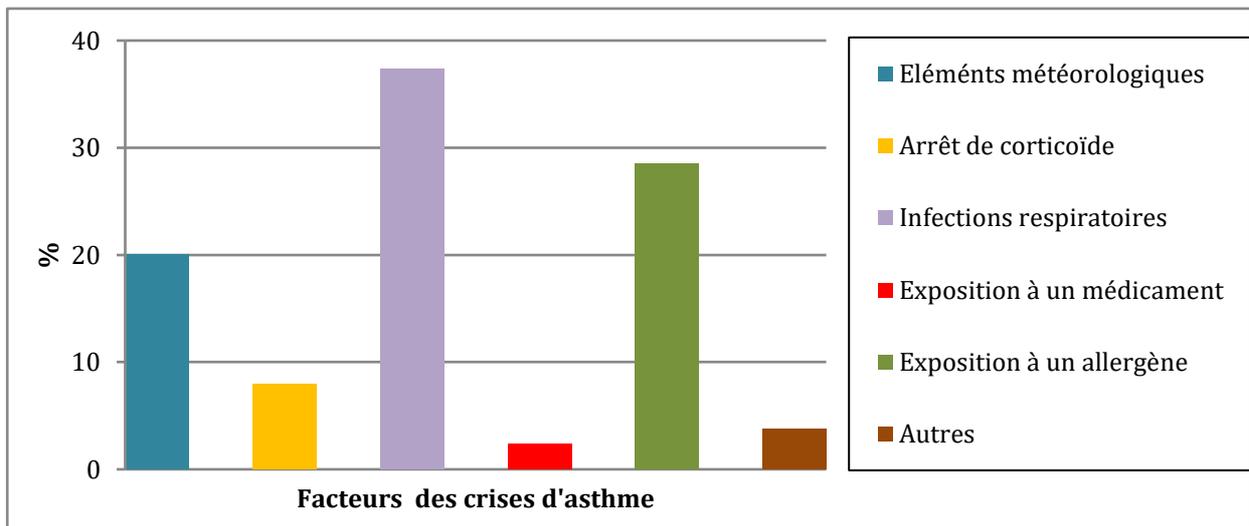


Figure 148 : Pourcentage des facteurs responsables de déclenchement des crises d'asthme aux urgences de Ben Arous du 1^{er} juin au 31 décembre tel que déclarés par les patients (*UOCD Ben Arous*).

XII. 3. UNE GRANDE VARIABILITE DES CRISES D'ASTHME DANS LE TEMPS

Pendant la période d'étude (du 1^{er} juin au 31 décembre), le nombre d'admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous a varié d'une saison à une autre, d'un mois à un autre et même d'un jour à un autre.

XII. 3. 1. Répartition des crises d'asthme dans la journée

Le déclenchement des crises d'asthme est plus important la première moitié de la journée (142 cas) avec un pic à 8 h. En effet, il existe une variation naturelle de l'asthme qui coïncide avec le rythme du sommeil. Il est plus important aux premières heures du

jour. L'asthmatique risque alors d'être réveillé par des quintes de toux ou une respiration sifflante. Il peut aussi être oppressé au lever, même si le sommeil n'a pas été perturbé. Par contre, c'est en milieu d'après-midi que l'asthmatique se sent généralement le mieux, et c'est à 13 h que le déclenchement des crises est le plus faible (Fig. 149).

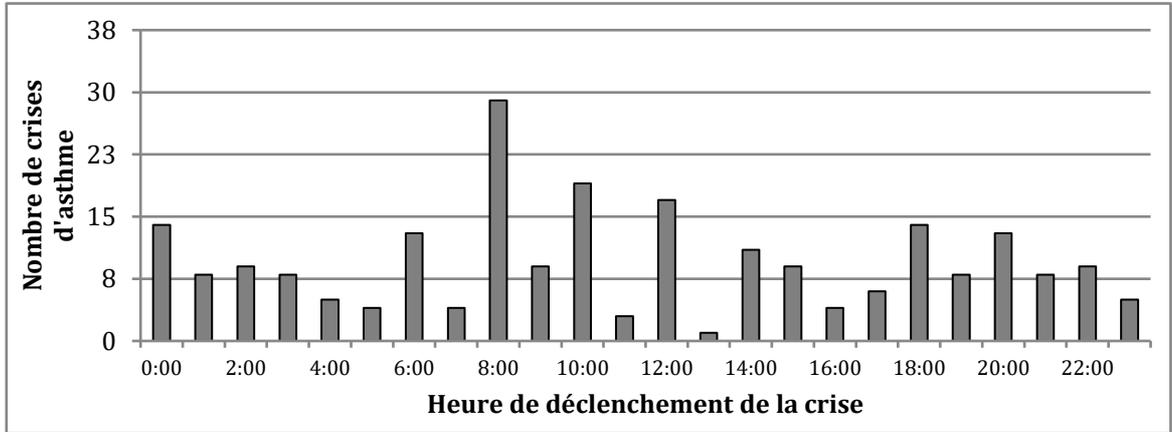


Figure 149 : Nombre de cas d'asthme aux urgences de Ben Arous selon l'heure de déclenchement de la crise (du 1^{er} juin au 31 décembre 2011) (UOCD Ben Arous).

XII. 3. 2. Variabilité mensuelle des crises d'asthme

Les crises enregistrées aux UOCD sont concentrées sur la période octobre-décembre. Elles sont en augmentation régulière à partir du mois de juin jusqu'au mois de décembre, avec une nette baisse au mois de septembre par rapport au mois d'août. Et c'est le mois de décembre qui reçoit le nombre le plus élevé de crises et enregistre le jour de pic d'admissions (Fig. 150 et 151).

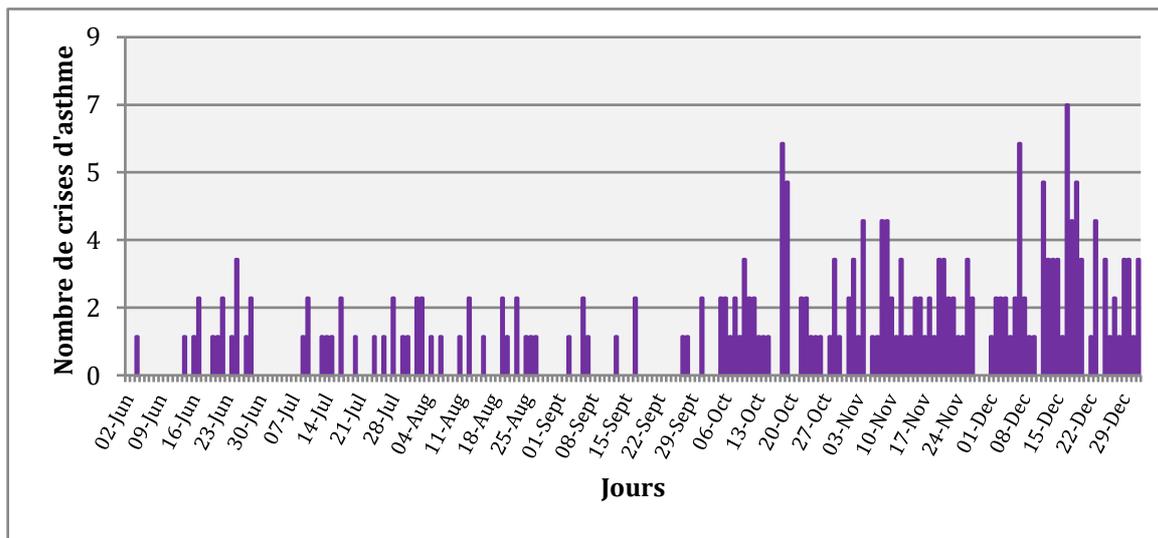


Figure 150 : Évolution quotidienne des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous du 1^{er} au 31 décembre 2011 (UOCD Ben Arous).

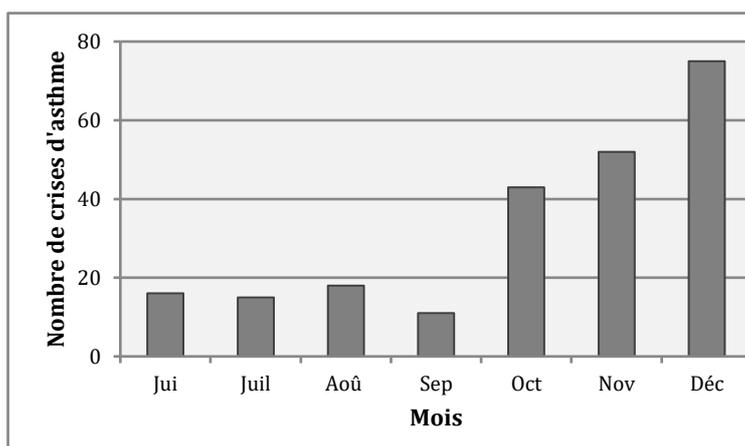


Figure 151 : Nombre mensuel des admissions pour crise d'asthme aux urgences de Ben Arous du 1^{er} juin au 31 décembre (UOCD Ben Arous).

XII. 4. ASSOCIATION ENTRE CRISES D'ASTHME ET VARIABLES METEOROLOGIQUES

Dans le but de distinguer les paramètres météorologiques les plus affectants sur le déclenchement des crises d'asthme, nous allons mettre en relation les variables météorologiques avec les admissions quotidiennes des crises d'asthme aux urgences de Ben Arous.

XII. 4. 1. Les crises d'asthme et la température de l'air ambiant

XII. 4.1. 1. Température minimale et maximale

L'évolution mensuelle du nombre des crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et celle des températures minimales et maximales mensuelles montrent que les baisses des températures correspondent assez bien avec la hausse des crises (Fig. 152).

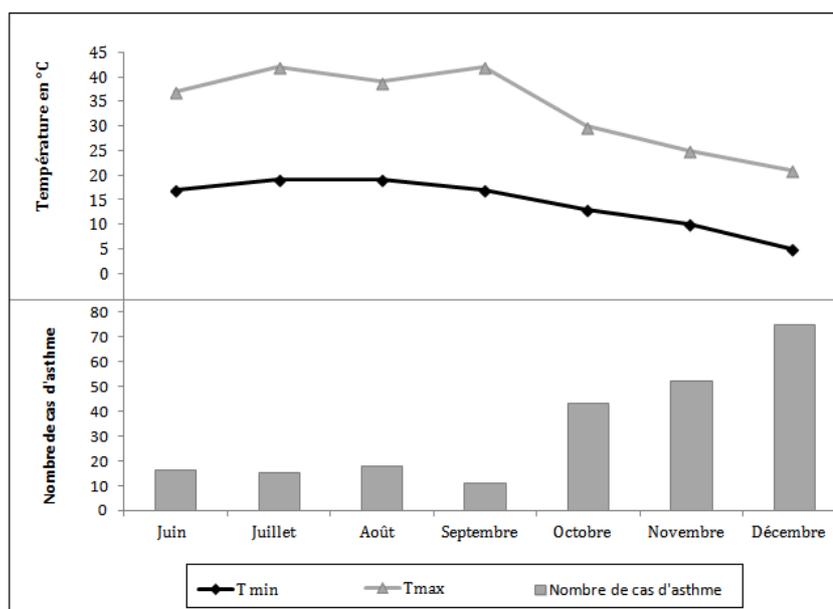


Figure 152 : Evolution mensuelle des crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) et des températures minimales et maximales à la station de Tunis-Carthage (Weather Underground) du 1^{er} juin au 31 décembre.

En effet, le nombre le plus élevé des visites aux urgences coïncide avec la saison automnale (octobre et novembre) et surtout au début de l'hiver (décembre) ce qui suggère une relation avec la température. Entre le 1^{er} juin et le 31 décembre 2011, la température moyenne de l'air ambiant a varié entre 9°C (le 19 décembre) et 34°C (le 02 septembre). La température maximale a été enregistrée le 11 juillet et le 02 septembre avec une valeur de 42°C et la température minimale a été de 4°C enregistrée le 29 décembre (Fig. 153).

Dans notre étude, le froid constitue 18 % des facteurs déclenchant des crises. Néanmoins, la sensation de froid varie notablement d'un individu à l'autre, en raison de l'âge, de la condition physique et de facteurs psychologiques. L'air froid extérieur est un risque pour les asthmatiques. Lorsque la personne souffrante passe par exemple de la chaleur d'un immeuble au froid de l'air extérieur, la conséquence de ce changement brusque de température est une contraction de la paroi de ses bronches. Cela provoque des quintes de toux, des difficultés respiratoires et une respiration sifflante (Osczveski, 2000). Pour cette raison, l'hiver est souvent une période de stress pour les personnes asthmatiques.

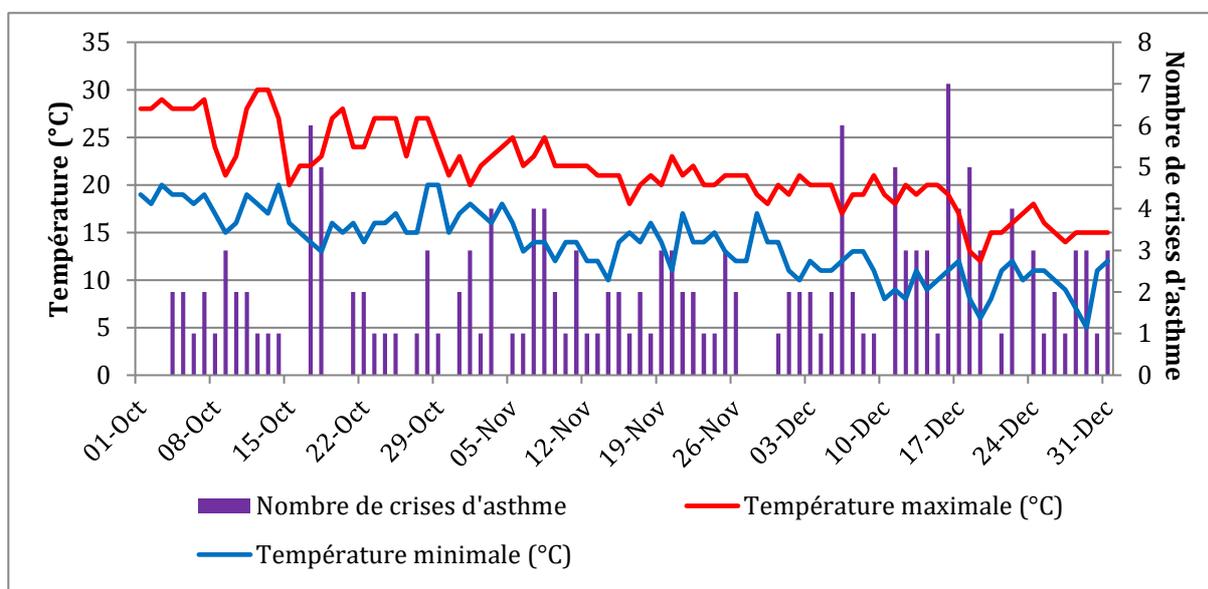


Figure 153 : Nombre quotidien d'admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) et les températures maximales et minimales à la station météorologique de Tunis-Carthage (INM) du mois d'octobre au mois de décembre 2011.

La figure suivante (Fig. 154) des admissions quotidiennes pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous pour la période allant du mois d'octobre au mois de décembre 2011, montre une zone de plateau, correspondant à un régime de température « confortable » où l'admission des asthmatiques demeure basse. Cette zone s'étend jusqu'à environ 14°C. En deçà de cette température, les visites aux urgences commencent à s'élever pour enregistrer un pic du nombre de cas d'asthme à 11°C.

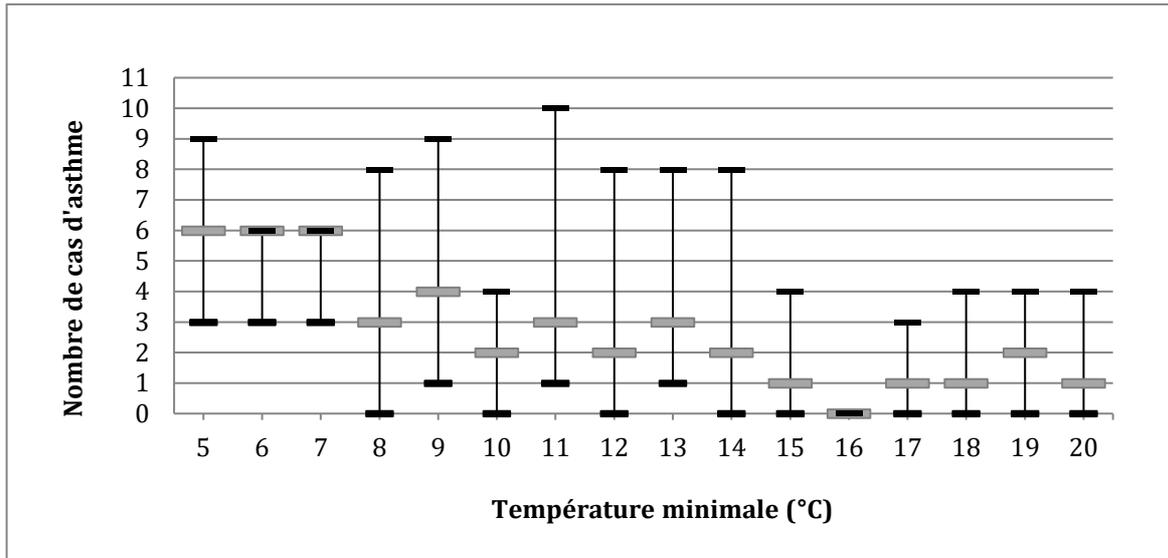


Figure 154 : Nombre d'admissions quotidiennes aux urgences de Ben Arous (*UOCD Ben Arous*) selon la température minimale du même jour, à la station météorologique de Tunis Carthage (*INM*), pour la période octobre-décembre 2011.

La relation entre la température minimale moyenne sur 3 jours ($j-2$, $j-1$ et j) et les admissions pour crises d'asthme, illustrée sur le graphique suivant, devient encore plus prononcée. Après 3 jours consécutifs avec une moyenne de températures minimales de 10°C, les visites pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous qui sont déjà en hausse, grimpent rapidement à plus de 40 % d'excès. Ces observations suggèrent que dans le Grand-Tunis, exactement dans la région de Ben Arous, les températures minimales ont beaucoup plus d'impact si elles perdurent au moins quelques jours (Fig. 155).

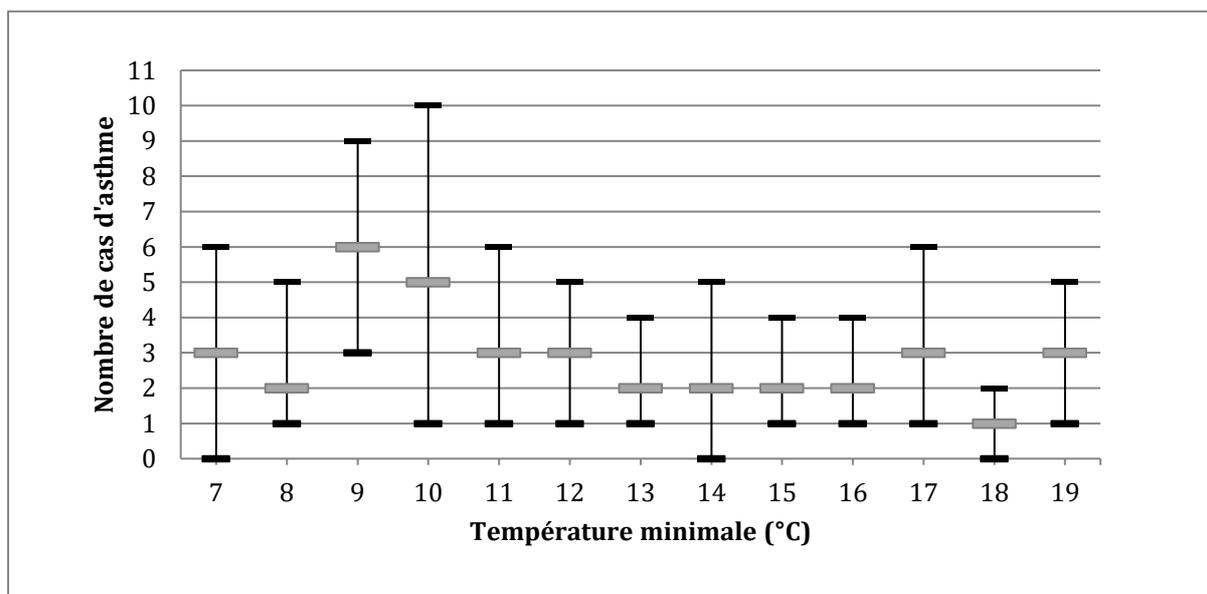


Figure 155 : Nombre d'admissions quotidiennes aux urgences de Ben Arous (*UOCD Ben Arous*) selon la température minimale sur 3 jours ($j-2$, $j-1$ et j) [°C], à la station météorologique de Tunis Carthage (*INM*), pour la période octobre-décembre 2011.

Il est toutefois important de noter que la saison froide est très courte dans notre enquête, elle n'est représentée que par le mois de décembre et l'intersaison est représentée par les mois d'octobre et de novembre. Au cours de cette période, le Grand-Tunis a été touché par deux vagues de froid : du 18 au 20 décembre et du 26 au 29 décembre (voir chapitre IV), pendant lesquelles 16 crises d'asthmes ont été enregistrées aux urgences de Ben Arous (Tab. 80).

Les vagues de froid	Jours des vagues de froid	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Nombre de crises d'asthme
Vague 1	18 décembre	13	8	5
	19 décembre	12	6	3
	20 décembre	15	8	0
Vague 2	26 décembre	15	10	1
	27 décembre	14	9	1
	28 décembre	15	7	3
	29 décembre	15	5	3

Tableau 80 : Les vagues de froid en décembre et nombre de crises d'asthmes correspondants. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Nous remarquons que les vagues de froid n'enregistrent pas toutes des crises d'asthme, et même le plus grand nombre de crises (7 crises enregistrées le 16 décembre) n'a pas été durant ces vagues de froid et ils n'ont enregistré que 7 % seulement des crises entre octobre et décembre. Cela signifie que l'excès des admissions pour crises d'asthme n'est pas lié au froid seulement, mais aussi à d'autres paramètres météorologiques et conditions environnementales.

XII. 4. 2. Crises d'asthme et humidité relative

XII. 4. 2. 1. L'humidité relative maximale et minimale

Les taux d'humidité relativement faibles sont enregistrés par saison estivale. La corrélation entre les taux d'humidité maximale et minimale avec le nombre journalier des crises d'asthme montre que plus les taux d'humidité minimale sont élevés plus les crises d'asthme sont fréquentes.

Nous avons enregistré des niveaux exceptionnellement élevés d'humidité en été, le 4 juin 2011, avec un maximum de 94 % et un minimum de 65 %, cependant nous n'avons enregistré aucun cas de crises d'asthme pendant ce jour-ci et les huit jours qui suivent. De ce fait, l'hygrométrie élevée et les températures basses constituent un facteur de risque pour les asthmatiques.

Le taux d'humidité pour les jours qui ont enregistré 4 crises et plus, a varié entre 52 % et 82 % et les minimales entre 26 % et 64 % et les maximales entre 73 % et 94 % (Fig. 156).

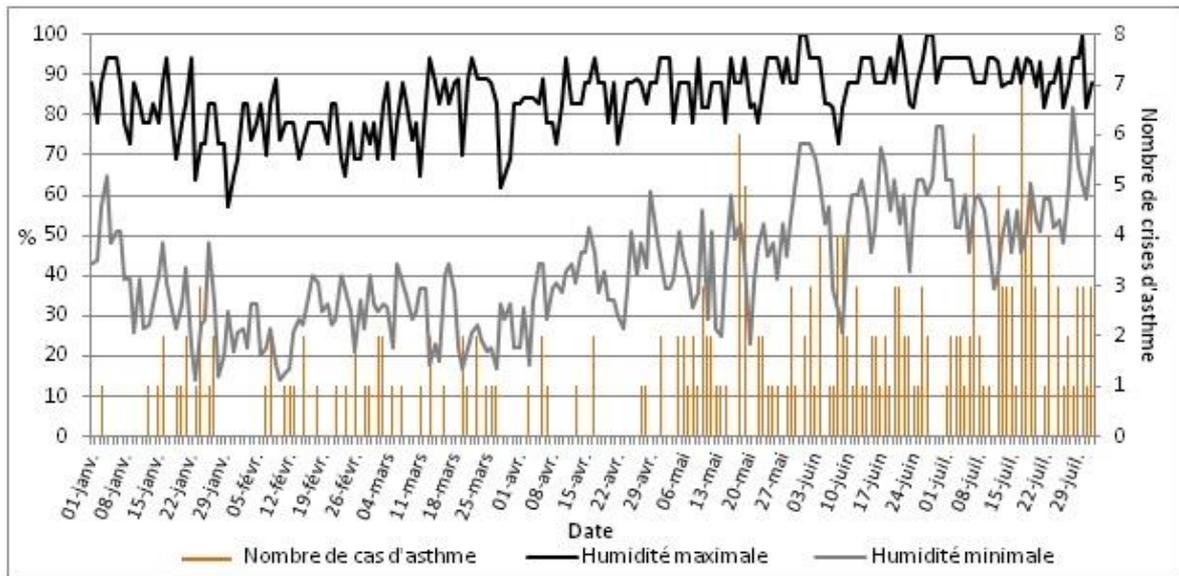


Figure 156 : Humidités maximales et minimales de l'air(en %) à la station de Tunis-Carthage (INM) et le nombre de crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) du 01 juin au 31 décembre 2011.

Pendant la saison chaude, l'air chaud et humide est plus inconfortable qu'un air moins chaud et humide. La figure montre que le nombre de crises d'asthme coïncide avec des températures élevées et des taux d'humidité maximale élevée aussi (Fig. 157).

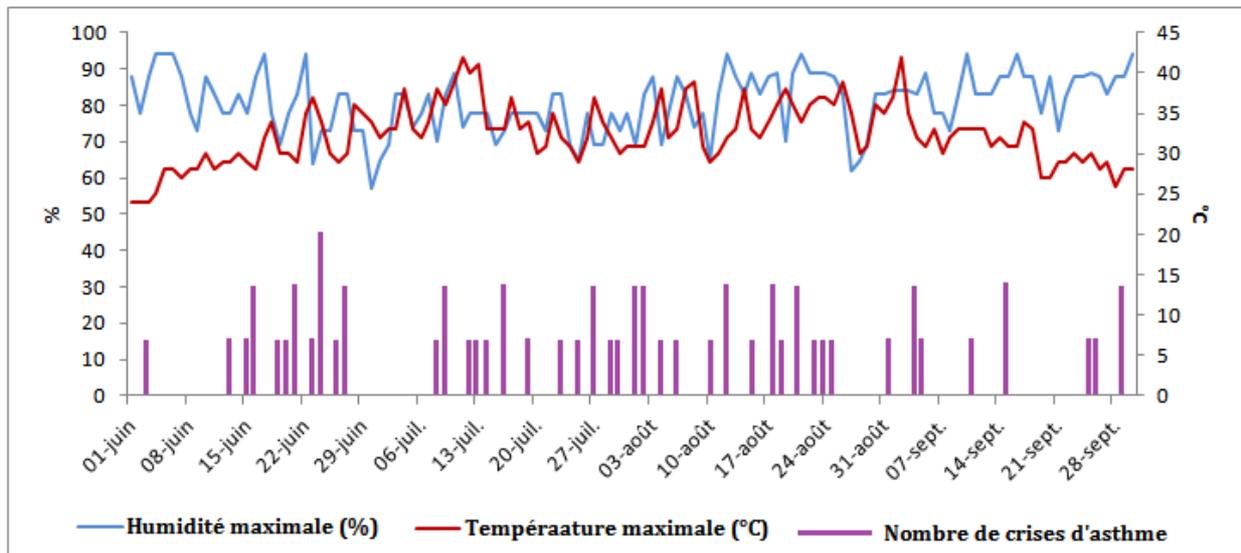


Figure 157 : Humidité relative (en %), température maximale (en °C) quotidiennes à la station de Tunis-Carthage (INM) et le nombre de crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) du 1^{er} juin au 31 septembre 2011.

XII. 4. 2. 2. Les fluctuations de l'humidité relative

La variation brusque de l'hygrométrie constitue également un facteur de risque de crise d'asthme, en particulier c'est la baisse de l'humidité relative qui s'avère la plus « asthmogène » (Rivoliier, 1972).

Rivolier (1972) retient qu'une variation de 30 % de l'humidité relative en 3 heures pourrait être nocive pour la santé humaine. Il retient qu'une variation de 30 % de l'humidité relative en 3 heures pourrait être nocive pour la santé humaine. Selon notre observation, une fluctuation tri-horaire de 20 % a été suffisante pour déclencher une crise d'asthme, notamment dans le sens de la baisse.

Pendant la saison froide (octobre-décembre), 29 crises sont survenues suite à une variation hygrométrique de 20 % et plus, contre 13 crises survenues pendant la saison chaude (juin-septembre). La majorité des plus fortes fluctuations de l'humidité relative ont été enregistrées entre 13h et 16h, période de réchauffement de l'air où l'humidité relative diminue (Tab.81, 82 et 83).

Tableau 81 : Nombre de crises d'asthme survenues après une variation de l'humidité relative de 20 % et plus de la période (juin-décembre 2011). (Source des données : UOCD Ben Arous et INM).

Période tri-horaire	Saison chaude (juin-septembre)			Saison froide (octobre-décembre)		
	Nombre de crises d'asthme	Sens de la variation		Nombre de crises d'asthme	Sens de la variation	
		+	-		+	-
1h-4h	4	0	4	4	3	1
4h-7h	2	0	2	4	2	2
7h-10h	0	0	0	5	0	5
10h-13h	2	2	0	7	5	2
13h-16h	5	5	0	5	1	4
16h-19h	0	0	0	3	2	1
19h-22h	0	0	0	0	0	0
Total	13	7	6	28	13	15

(+) : Elévation de l'humidité relative de l'air.

(-) : Baisse de l'humidité relative de l'air.

Tableau 82 : Dates et heures des crises d'asthme survenues suite à des chutes de l'humidité relative de l'air de la période juin-septembre 2011. (Source des données : UOCD Ben Arous et INM).

Date de la crise	Heure de la crise	Période tri-horaire	Variation de l'humidité à 3 heures de la crise (en %)
29 juillet	8 h	1h-4h	24-
14 juillet	2 h	1h-4h	25-
12 juillet	11 h	10h-13h	32 +
27 juillet	10 h	4h-7h	27-
12 août	6 h et 5 h	1h-4h	21-
15 août	15 h	13h-14h	25+
24 août	12 h	10h-13h	51+
25 août	10 h	4h-7h	24-
02 septembre	16 h	13h-16h	21+
16 septembre	19 h	13h-16h	29+
30 septembre	20 h et 20 h	13h-16h	28+

(+) : Elévation de l'humidité relative de l'air.

(-) : Baisse de l'humidité relative de l'air.

Tableau 83 : Dates et heures des crises survenues suite à des chutes de l'humidité relative de l'air de la période octobre-décembre. (Sources des données : UOCD Ben Arouset INM).

Date de la crise	Heure de la crise	Période tri-horaire	Variation de l'humidité à 3 heures de la crise (en %)
8 octobre	9 h	7h-10h	26 -
4 octobre	12 h	10h-13h	33 -
7 octobre	5 h	4h-7h	24 +
7 octobre	6 h	4h-7h	24 +
10 octobre	20 h	16h-19h	28 +
10 octobre	21 h	16h-19h	28 +
12 octobre	8 h	7h-10h	21 -
13 octobre	18 h	13h-16h	28 +
14 octobre	15 h	13h-16h	30 -
18 octobre	9 h	7h-10h	27 -
18 octobre	12 h	10h-13h	42 +
18 octobre	20 h	16h-19h	40 -
25 octobre	2 h	1h-4h	26 -
27 octobre	3 h	1h-4h	20 +
28 octobre	2 h et 3 h	1h-4h	20 -

6 novembre	6 h	4h-7h	31 -
7 novembre	10 h	10h-13h	30 -
14 novembre	14 h	13h-16h	37 -
20 novembre	16 h et 17 h	13h-16h	20 -
02 décembre	6 h	4h-7h	35 -
03 décembre	9 h	7h-10h	34 -
9 décembre	12 h	7h-10h	30 -
14 décembre	12 h, 12 h et 12 h	10h-13h	38 +
16 décembre	12 h	10h-13h	30 +
25 décembre	8 h	4h-7h	22 -

(+) : Elévation de l'humidité relative de l'air.

(-) : Baisse de l'humidité relative de l'air.

XII. 5. INDICATEURS ET SEUILS PREVISIONNELS D'EXCES 'ADMISSION POUR CRISES D'ASTHME AUX URGENCES DE BEN AROUS

La première étape, de cette démarche consiste à identifier les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et les épisodes correspondants. Ensuite, nous testerons les différents indicateurs biométéorologique, chacun avec différents niveaux de seuils pour trouver celui qui nous aurait permis de prévoir les épisodes significatifs, le plus fidèlement possible.

XII. 5. 1. Seuil critique des admissions pour crises d'asthme et épisodes correspondants

Le nombre d'admissions quotidien pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous pour la période allant du 1^{er} juin au 31 décembre a varié de 0 (94 jours durant la période d'étude) à 7 (un seul jour) (Tab. 84). Le calcul du 95^{ème} centile est égal à 4. Quatre est donc le seuil critique d'admission hospitalière aux urgences de Ben Arous. De ce fait, nous enregistrons 11 jours de pics.

La saison froide, représentée par le mois de décembre, enregistre le maximum des pics quotidiens des admissions pour crises d'asthme avec 6 pics (31 crises), tandis que la saison intermédiaire, représentée ici par les mois d'octobre et novembre, n'a enregistré que 5 pics : 3 pics (12 crises) au mois de novembre et 2 pics (11 crises) au mois d'octobre.

Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme forment 7 épisodes : 3 épisodes pendant la saison intermédiaire (épisode 1 : le 17 et le 18 octobre ; épisode 2 : le 3 novembre et épisode 3 : le 7 et 8 novembre) et 4 épisodes pendant la saison froide (épisode 4 : le 6 décembre ; épisode 5 : le 11 décembre ; épisode 6 : du 16 au 18 décembre et épisode 7 : le 22 décembre). Ces épisodes représentent les alertes réelles, c'est-à-dire les alertes qui auraient dû être lancées s'il y avait eu un système de vigie.

Tableau 84 : Jours des pics quotidiens des crises d'asthme admis aux urgences de Ben Arous en et épisodes correspondants. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Episodes	Date	Nombre d'admission de crises d'asthme
Episode 1	17 octobre	6
	18 octobre	5
Episode 2	03 novembre	4
Episode 3	07 novembre	4
	08 novembre	4
Episode 4	06 décembre	6
Episode 5	11 décembre	5
Episode 6	16 décembre	7
	17 décembre	4
	18 décembre	5
Episode 7	22 décembre	4

Après l'identification des jours de pic des admissions pour crises d'asthme, nous allons tester les différents indicateurs biométéorologiques (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2") pour choisir les meilleurs seuils prédictifs indiquant une admission hospitalière significative pour crises d'asthme.

Les indicateurs météorologiques utilisés ont été, pour chaque jour, les valeurs maximales et minimales de la température de l'air ambiant (en °C), de l'humidité relative (en %). Pour le vent, il s'agit de la vitesse maximale (en m/s). Ces indicateurs sont analysés par type de saison : la saison froide (décembre) et l'intersaison (octobre et novembre).

XII. 5. 2. Détermination du seuil biométéorologique des extrêmes météorologiques de la saison froide

Les résultats des mesures des variables météorologiques pendant la saison froide, manifestées par le mois de décembre, ont été analysés par type d'indicateur (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). Pour calculer la sensibilité et la spécificité, nous avons utilisé comme cible de prévision les 6 jours des surplus des admissions pour crises d'asthme qui forment 4 épisodes pendant cette saison.

Pour le choix d'un seuil, nous avons en outre jugé qu'il était incontournable de prévoir correctement l'épisode 3 qui coïncide avec une vague de froid (du 18 au 20 décembre 2009) et le jour de pic des crises d'asthme (7 crises : le 16 décembre 2009).

XII. 5. 2. 1. Indicateur basé sur les variables météorologiques du même jour : (C1, C2)

Le tableau suivant (Tab. 85) résume les résultats obtenus des mesures des variables météorologiques enregistrées durant les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous pendant la saison froide. Pendant cette saison, les variables météorologiques ont varié comme suit :

- la température : entre 8 et 19°C ;
- l'humidité relative de l'air : entre 40 et 94 % ;
- la vitesse maximale du vent a varié entre 4 et 9 m/s.

Tableau 85 : Résultats des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme, aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant le mois de décembre. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Episodes	Date des pics	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Episode 1	06 décembre	12	17	59	88	6
Episode 2	11 décembre	9	18	40	93	4
Episode 3	16 décembre	11	19	46	88	7
	17 décembre	12	17	51	94	8
	18 décembre	8	13	63	93	9
Episode 4	22 décembre	12	16	59	88	7

Dans les tableaux suivants, nous montrons les sensibilités et spécificités obtenues avec des seuils portant simultanément sur les valeurs extrêmes (minimales et maximales) de la température, de l'humidité relative et de la vitesse maximale du vent, calculés selon les différents types d'indicateurs [(C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2")]. Etant donné que nous n'avons que six jours à prédire, la sensibilité variera de façon discrète. Pour chaque indicateur nous avons retenu le seuil qui donne les meilleures performances.

La température

Avec cet indicateur (C1, C2), tous les seuils prévoient l'épisode 3. Le meilleur seuil optimal serait : **Tmin > 8 °C** et **Tmax > 13°C**. Ce seuil, par comparaison aux autres, présente la meilleure spécificité (95 %) et les plus faibles fausses alertes (1 jour), mais aussi, il prévoit tous les épisodes des surplus des admissions pour crises d'asthme (Tab. 86).

Tableau 86 : Seuils optimaux de la température avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jour)	Spécificité (%)	Episodes prévus
8	13	6	0	100	1	95	1-2-3-4
9	18	2	4	33,3	5	66,7	2-3
11	19	4	2	66,7	12	7,7	2-3
12	17	3	3	50	11	15,4	1-3-4
12	16	2	4	33,3	10	16,7	3-4

L'humidité relative

Avec l'indicateur (C1, C2), tous les seuils prévoient l'épisode 3. Le meilleur seuil optimal serait : **Hmin > 59 %** et **Hmax > 88 %**. Ce seuil présente une sensibilité de 50 %, une spécificité de 47,7 % et 3 jours des surplus des admissions pour crises d'asthme, manqués sur 6. Il représente aussi un faible nombre de jours de fausse alerte (9 jours) (Tab. 87).

Tableau 87 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1, C2).
(Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
59	88	3	3	50	9	47,1	1-3-4
40	93	6	0	100	13	7,1	1-2-3-4
46	88	3	3	50	12	50	1-3-4
51	94	4	2	66,7	18	0	1-3
63	93	1	5	16,7	2	81,8	1-2-3-4

Le vent :

Selon les résultats du tableau 88, le choix du seuil anémométrique sera entre 3 seuils dont les vitesses maximales du vent sont 7 ; 8 et 9 m/s car ils prévoient l'épisode 3. Et parmi ces 3 seuils, le meilleur serait : **Vmax > 7 m/s**. Il présente une forte sensibilité (50%), la meilleure spécificité (28 %), le plus faible nombre de fausses alertes et 3 jours de pic manqués sur 6.

Tableau 88 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Vmax	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausses alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
4	2	4	33,3	4	84	2
6	2	4	33,3	11	56	1-2
7	3	3	50	18	28	1-2-3-4
8	4	2	66,7	23	23,3	1-2-3-4
9	6	0	100	26	16,1	1-2-3-4

XII. 5. 2. 2. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur deux jours : (C1', C2')

Les résultats des moyennes des variables météorologiques du jour de pic et le jour qui précède, sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 89). Ce tableau montre que :

- la température a varié entre 9 et 20°C ;
- l'humidité relative de l'air a varié entre 39 et 94 % ;
- la vitesse maximale du vent a varié entre 5 et 9 m/s.

Tableau 89 : Résultats des moyennes des extrêmes climatiques des jours de pics et le jour précédent des admissions pour crises d'asthme aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage pendant le mois de décembre. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Épisodes	Date des pics	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	6 décembre	12	19	53	91	7
Épisode 2	11 décembre	9	19	39	94	5
Épisode 3	16 décembre	11	20	51	91	7
	17 décembre	12	18	49	91	7
	18 décembre	9	20	57	94	8
Épisode 4	22 décembre	12	16	59	85	9

Comme pour l'indicateur (C1, C2), les résultats de calcul de la sensibilité et spécificité de la température, de l'humidité relative de l'air et de la vitesse maximale du vent, basés sur l'indicateur (C1', C2') sont présentés comme suit :

La température :

Pour la température, le meilleur seuil est celui de **Tmin > 9°C** et **Tmax > 19°C**. Ce seuil obéit à toutes les conditions : il prévoit trois épisodes dont l'épisode 3, une forte sensibilité (66,7 %) et une spécificité de 40 % ainsi que le plus faible nombre de fausses alertes (6 jours) (Annexe VIII. 1).

L'humidité relative :

Le meilleur seuil pour l'humidité relative sera celui de **Hmin > 51 %** et **Hmax > 91 %**. Il prévoit 3 épisodes dont l'épisode 3, présente une forte sensibilité (50 %) ainsi qu'un nombre relativement faible de fausses alertes (9 jours) (Annexe VIII. 2).

Le vent :

Le choix optimal pour le vent sera entre 3 seuils avec des vitesses maximales du vent de 7, 8 et 9 m/s car tous prévoient l'épisode 3. Parmi ces 3 seuils, le seuil optimal serait **Vmax > 7 m/s**. Ce seuil présente une forte sensibilité (66,7 %), une spécificité de 28 % avec 2 jours manqués sur 6 et 18 jours de fausses alertes en un seul mois (Annexe VIII. 3).

XII. 5. 2. 3. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur trois jours : (C1", C2")

Le tableau suivant (Tab. 90) résume les résultats obtenus des mesures des variables météorologiques enregistrées durant les jours de pics des admissions pour crises d'asthme et j-2 aux urgences de Ben Arous pendant le mois de décembre. Les variables météorologiques ont varié comme suit :

- la température : entre 9 et 20°C ;
- l'humidité relative de l'air : entre 42 et 94 % ;
- la pression atmosphérique : entre 1014 et 1026 hPa ;
- la vitesse maximale du vent : entre 4 et 8 m/s.

Tableau 90 : Résultats des moyennes des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme et j-2, aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage pendant le mois de décembre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Épisodes	Date des pics	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max (m/s)
Épisode 1	06 décembre	11	19	55	92	6
Épisode 2	11 décembre	9	19	42	94	4
Épisode 3	16 décembre	10	20	49	90	6
	17 décembre	11	19	51	92	7

	18 décembre	10	16	53	92	8
Épisode 4	22 décembre	10	15	56	88	8

Le résultat de calcul de sensibilité et spécificité, basé sur les températures minimales et maximales du jour j et jour-2 sont présentées comme suit :

La température

Le meilleur seuil pour la température sera celui de : **Tmin > 10°C** et **Tmax > 15°C**. Ce seuil représente une sensibilité de 16,7 %, forte spécificité (62,5 %), un nombre faible de fausses alertes (6 fausses alertes en un seul mois) avec 4 épisodes prévus dont l'épisode 3 mais avec 5 jours manqués sur 6 (Annexe VIII. 4).

L'humidité relative

Pour cet indicateur, le meilleur hygrométrique seuil sera celui de **Hmin > 53 %** et **Hmax > 92 %**. Ce seuil prévoit 3 épisodes dont l'épisode 3, présente une forte sensibilité (50 %), une spécificité de 42,9 % et un nombre relativement faible de fausses alertes (8 jours en un seul mois) (Annexe VIII. 5).

Le vent

Selon les résultats du tableau 108, le choix du seuil anémométrique sera entre 3 seuils avec les vitesses maximales du vent de 6, 7 et 8 m/s car ils prévoient l'épisode 3. Parmi ces 3 seuils, le meilleur serait **Vmax > 6 m/s**. Ce dernier présente une forte sensibilité (50 %), une forte spécificité aussi (50 %) avec 3 jours manqués sur 6 et 11 fausses alertes, on ne tolère pas un grand nombre de fausses alertes comme celui présenté par la vitesse de 8 m/s (23 jours) (Annexe VIII. 6)

XII. 5. 2. 4.L'indicateur biométéorologique le plus pertinent pendant la saison froide

Le choix parmi les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2") donne les seuils biométéorologiques des paramètres météorologiques suivants :

La température :

Le tableau 91 permet de conclure que l'indicateur (C1, C2) basé sur (Tmin, Tmax) est inférieur aux autres indicateurs basé sur (Tmin 2j, Tmax 2j) ou sur (Tmin 3j, Tmax 3j). Grâce à ses limites thermiques très basses (Tmin > 8 et Tmax > 13), cet indicateur prévoit tous les épisodes et présente la meilleure spécificité et la meilleure sensibilité ainsi que le plus faible nombre de fausses alertes, bien que ces faibles limites thermiques l'empêchent de prévoir les épisodes et les jours de pics des crises avec des températures supérieures au seuil présenté qui ne sont pas négligeables. Il est donc préférable de retenir les valeurs seuil de l'indicateur (C1', C2'), basées sur les températures minimales et maximales du jour j et jour-1 : Tmin > 9°C et Tmax > 19°C. Ce dernier présente une spécificité de 40 %, une sensibilité de 66,7 % et prévoit 5 jours sur 6 et seulement 6 fausses alertes en un mois.

Tableau 91 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Indicateur	T min (°C)	T max (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	8	13	6	0	100	1	95	1-2-3-4
(C1', C2')	9	19	4	2	66,7	6	40	1-2-3
(C1'', C2'')	10	15	1	5	16,7	6	62,5	1-2-3-4

L'humidité relative

D'après le tableau 92, nous constatons que les indicateurs (C1, C2) et (C1', C2') basés sur (Hmin, Hmax) et (Hmin 2j, Hmax 2j) présentent le même seuil (Hmin > 51 % et Hmax > 91 %) avec une sensibilité de 50 % et une spécificité de 25 %. L'indicateur (C1'', C2'') prévoit tous les épisodes avec une meilleure sensibilité (66,7 %) et un nombre plus faible de jours manqués (2 jours). Donc nous retenons le seuil basé sur l'humidité relative minimale et maximale du jour j et jour-2 : **Hmin > 51 % et Hmax > 92 %**.

Tableau 92 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). (Source des données : INM et urgences de Ben Arous)

Indicateur	Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	51	91	3	3	50	9	25	1-2-3
(C1', C2')	51	91	3	3	50	9	25	1-2-3
(C1'', C2'')	51	92	4	2	66,7	9	25	1-2-3-4

Le vent :

Les résultats des seuils de la vitesse maximale du vent pour chaque indicateur sont présentés dans le tableau 94. D'après ce dernier, nous constatons que les indicateurs (C1, C2) et (C1', C2') basés sur (Vmax) et (Vmax2j) présentent le même seuil (Vmax > 7 m/s), mais avec des caractéristiques différentes. L'indicateur (C1'', C2'') prévoit 3 épisodes avec une forte sensibilité (56 %), 3 jours de pics manqués sur 6 et 18 fausses alertes. Donc nous retenons ce seuil basé sur la vitesse maximale du jour j et jour-2 : **Vmax > 6 m/s**.

Tableau 93 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Indicateur	Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	7	3	3	50	18	28	1-2-3-4
(C1', C2')	7	4	2	66,7	18	28	1-2-3
(C1'', C2'')	6	3	3	50	11	56	1-2-3

Au final, nous pouvons conclure qu'au cours de la saison froide, les asthmatiques à Ben Arous tolèrent mal la température nocturne inférieure à 9°C (type de temps très froid) et la température diurne inférieure à 19°C. Ce seuil thermique est moyenné sur 2 jours, donc il est probable d'avoir des détresses respiratoires amenant aux urgences même après 48h. Quant au seuil hygrométrique, il oscille entre 51 % du côté inférieur et 92 % du côté supérieur. En outre, la valeur seuil de tolérance de la vitesse maximale du vent est égale à 6 m/s. Pour ces deux derniers seuils biométéorologiques, moyennés sur 3 jours, le risque de crises d'asthme est susceptible même après 72h.

XII. 5. 3. Les jours de pics et types de stress météorologiques pendant la saison froide

Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal, pendant la saison froide, donnent deux jours de pics succèdent à un stress météorologique à un seul composant et 3 jours de pics succèdent à un stress météorologique à deux composants. Tandis que le jour de pic du 6 décembre 2011 n'a été lié à aucun stress météorologique (Tab. 94) :

-Pics liés à un stress météorologique à un seul composant :

- un pic lié à un stress hygrométrique avec une humidité minimale et maximale : le 11 décembre 2011 ;
- un pic lié à un stress hygrométrique avec une humidité minimale : le 16 décembre 2011 ;
- un pic lié à un stress anémométrique : le 18 décembre 2011.

- Pics liés à un stress météorologique à deux composants :

Deux pics sont liés à un stress thermique et anémométrique, avec une température minimale et une vitesse maximale du vent : le 17 et le 22 décembre 2011.

Tableau 94 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous, les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison intermédiaire en 2009. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous)

Épisodes	Date des pics	Température (°C) (C1', C2')		Humidité (%) (C1'', C2'')		Vent (m/s) (C1'', C2'')
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	6 décembre	12	19	55	92	6
Épisode 2	11 décembre	9	19	42	94	4
Épisode 3	16 décembre	11	20	49	90	6
	17 décembre	12	18	51	92	7
	18 décembre	9	20	53	92	8
Épisode 4	22 décembre	12	16	56	88	8

XII. 5. 4. Seuils biométéorologiques des extrêmes météorologiques de la saison intermédiaire

Les tableaux qui suivent montrent les résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme, aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison intermédiaire représentée par les mois d'octobre et de novembre.

Les sensibilités et spécificités sont obtenues avec des seuils portant simultanément sur les valeurs extrêmes (minimales et maximales) de la température, de l'humidité relative et la vitesse maximale du vent, calculés selon les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). Il y a cinq jours à prédire et 3 épisodes. Pour chaque valeur de sensibilité possible, nous avons retenu le seuil qui donne les meilleurs résultats.

Pour le choix d'un seuil, il faut ajouter le critère que l'épisode 1 (17 et 18 octobre 2011), qui enregistre le plus grand nombre de visites aux urgences de Ben Arous pendant cette période (6 crises, le 17 octobre), doit être correctement prédit.

XII. 5. 4. 1. Indicateur basé sur les variables météorologiques du même jour : (C1, C2)

Pendant l'intersaison, représentée par les mois d'octobre et de novembre, les variables météorologiques ont varié comme suit (Tab. 95) :

- la température : entre 13 et 25°C ;
- l'humidité relative de l'air : entre 31 et 94 % ;
- la vitesse maximale du vent entre 4 et 7 m/s.

Tableau 95 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme, aux services des urgences de Ben Arous, enregistrées à Tunis-Carthage pendant les mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Épisodes	Date des pics	Température (°C)		Humidité (%)		Pression atmosphérique (hPa)		Vent (m/s)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Max	Moy
Épisode 1	17 octobre	14	22	53	88	1021	1023	6	3
	18 octobre	13	23	44	94	1022	1024	4	2
Épisode 2	3 novembre	16	23	64	94	1013	1016	6	3
Épisode 3	7 novembre	14	23	31	73	1016	1018	7	4
	8 novembre	14	25	26	82	1018	1020	4	3

Le calcul des sensibilités et spécificités selon l'indicateur (C1, C2), obtenues avec les valeurs extrêmes de la température, de l'humidité relative et de la vitesse maximale du vent, donne le meilleur seuil de chaque paramètre météorologique.

La température

Le meilleur seuil thermique est celui de **Tmin > 14°C** et **Tmax > 22°C**. Ce seuil obéit à toutes les conditions. Il prévoit les trois épisodes, mais avec un nombre de fausses alertes relativement élevé (20 jours) et un seul jour de pic prévu (Annexe VIII. 7).

L'humidité relative

Pour l'humidité relative, nous devons choisir entre deux seuils qui prévoient l'épisode 1. Le meilleur seuil sera celui de : **Hmin > 53 %** et **Hmax > 88 %**, car il présente une bonne spécificité (33 %) et une sensibilité de 20 %, mais un seul jour de pic prévu sur 5 et 16 fausses alertes en deux mois (Annexe VIII. 8).

Le vent

Tous les seuils de la vitesse maximale du vent prévoient l'épisode 1. Le meilleur seuil pour cet indicateur est celui de **Vmax > 6m/s**. Il prévoit 3 épisodes, présente une forte sensibilité (80 %), une spécificité de 42,9 %, prévoit 4 jours de pics et 32 fausses alertes (Annexe VIII. 9).

XII. 5. 4. 2. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur deux jours : (C1', C2')

Les moyennes des variables météorologiques du jour de pic et le jour qui précède, sont présentées dans le tableau suivant (Tab. 96). Ce tableau montre que :

- la température a varié entre 14 et 24°C ;
- l'humidité relative de l'air a varié entre 29 et 94 % ;
- la vitesse maximale du vent a varié entre 5 et 8 m/s.

Tableau 96 : Résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme et les jour-1, aux services des urgences de Ben Arous pendant le mois d'octobre et novembre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Épisodes	Date des pics	Température (°C)		Humidité (%)		Vent (m/s)
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	17 octobre	14	22	51	88	7
	18 octobre	14	23	49	91	5
Épisode 2	3 novembre	17	23	67	94	5
Épisode 3	7 novembre	14	23	34	76	8
	8 novembre	14	24	29	76	5

La température

Le meilleur seuil thermique optimal varie entre **Tmin > 14°C** et **Tmax > 23°C**. Il prévoit 2 épisodes dont l'épisode 1, présente la meilleure spécificité (28,1 %), une forte sensibilité (60 %), 23 fausses alertes et 3 jours de pics prévus sur 5. (Annexe VIII. 10)

L'humidité relative

Seulement 2 seuils hygrométriques prévoient l'épisode 1. Parmi eux, le meilleur seuil est celui de **Hmin > 49 %** et **Hmax > 91 %**. Ce dernier présente une sensibilité de 40 %, une spécificité de 16,7 %, 2 jours de pics prévus sur 5 et 20 fausses alertes (Annexe VIII. 11).

Le vent

Le seuil de **Vmax > 5 m/s** est le meilleur seuil éolien pour cet indicateur. Il prévoit 3 épisodes, présente une forte sensibilité (60 %), la meilleure spécificité (62,5 %), prévoit 3 jours de pics sur 5 et 21 fausses alertes qui est le plus faible nombre par rapport aux autres seuils (Annexe VIII. 12).

XII. 5. 4. 3. Indicateur basé sur les variables météorologiques moyennées sur trois jours : (C1", C2")

Les mesures des variables météorologiques enregistrées durant les jours de pics des admissions pour crises d'asthme et j-2 aux urgences de Ben Arous pendant le mois de décembre sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 120). Selon ce tableau, les variables météorologiques ont varié comme suit (Tab. 97) :

- la température : entre 14 et 23°C ;

- l'humidité relative de l'air : entre 31 et 94 % ;
- la pression atmosphérique : entre 1008 et 1023 hPa ;
- la vitesse maximale du vent : entre 6 et 9 m/s.

Tableau 97 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme et j-2, aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage pendant les mois d'octobre et novembre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Épisodes	Date des pics	Température (°C)		Humidité (%)		Pression atmosphérique (hPa)		Vent (m/s)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Max	Moy
Épisode 1	17 octobre	18	21	54	90	1018	1021	7	3
	18 octobre	14	22	49	90	1020	1023	6	3
Épisode 2	3 novembre	17	22	69	94	1015	1017	6	3
Épisode 3	7 novembre	14	23	42	79	1008	1014	9	4
	8 novembre	14	23	31	79	1013	1018	6	3

Les meilleurs seuils thermique, hygrométrique et éolien pour l'indicateur (C1", C2") sont présentés comme suit :

La température

Le seuil optimal pour la température est de : **Tmin > 17°C** et **Tmax > 22°C**, il prévoit 2 épisodes dont l'épisode 1, présente une très forte spécificité (81 %), une sensibilité de 40 %, 2 jours de pics prévus sur 5 et seulement 4 fausses alertes en deux mois, soit 2 jours par mois (Annexe VIII. 13).

L'Humidité relative

Pour l'humidité relative, le choix sera entre les deux seuils qui prévoient l'épisode 1. Et entre les deux, le meilleur est de **Hmin > 54 %** et **Hmax > 90 %**, car il présente une forte sensibilité (40 %), une spécificité de 42,9 %, deux jours de pics prévus sur 5 et seulement 12 fausses alertes en deux mois (Annexe VIII. 14).

Le vent

Le meilleur seuil anémométrique est celui de **Vmax > 6 m/s**. Il prévoit les trois épisodes, présente la meilleure spécificité (42,9 %), une forte sensibilité (60 %), trois jours de pics prévus sur 5 ainsi que le plus faible nombre de fausses alertes (32 jours) (123) (Annexe VIII. 15).

XII. 5. 4. 4. L'indicateur biométéorologique le plus pertinent pendant la saison intermédiaire

Le choix parmi les indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2'') donne les meilleurs seuils biométéorologiques pour chaque paramètre météorologique pendant la saison intermédiaire.

La température

Le seuil de **Tmin > 17°C** et **Tmax > 22°C** de l'indicateur (C1'', C2'') basé sur les températures maximales et minimales moyennées sur trois jours est le meilleur. Clairement, la spécificité est très importante (81 %) car on ne peut pas tolérer un nombre élevé de fausses alertes, il ne présente que 4 fausses alertes, c'est-à-dire on n'a enregistré que 4 jours de fausses alertes sur 61 jours. Il présente aussi, une forte sensibilité (40 %) et prévoit 2 jours de pic sur 5 (Tab. 98).

Tableau 98 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Indicateur	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	14	22	1	4	20	20	4,8	1-2-3
(C1', C2')	14	23	3	2	60	23	28,1	1-3
(C1'', C2'')	17	22	2	3	40	4	81	1-2

L'humidité relative

Concernant l'humidité relative, le seuil de l'indicateur (C1', C2') basé sur (Hmin 2j, Hmax 2j) est le meilleur, avec **Hmin > 54 %** et **Hmax > 90 %**. Il présente la meilleure sensibilité (40 %) et la meilleure spécificité (42,9 %) ainsi que le plus faible nombre de fausses alertes (12 jours en deux mois), bien qu'il ne prévoie qu'un seul épisode (Tab. 99).

Tableau 99 : Seuils optimaux avec l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Indicateur	Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	53	88	1	4	20	16	33,3	1-2
(C1', C2')	49	91	2	3	40	20	16,7	1
(C1'', C2'')	54	90	2	3	40	12	42,9	1

Le vent

Le seuil de **Vmax > 5 m/s** de l'indicateur (C1', C2'), basé sur Vmax 2j, présente les meilleures caractéristiques : prévoit les trois épisodes, une forte sensibilité (60 %), la meilleure spécificité (62,5 %) et le plus faible nombre de fausses alertes (21 jours en deux mois) (Tab. 100).

Tableau 100 : Seuils optimaux avec la vitesse maximale du vent (m/s) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Indicateur	Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
(C1, C2)	6	4	1	80	32	42,9	1-2-3
(C1', C2')	5	3	2	60	21	62,5	1-2-3
(C1", C2")	6	3	2	60	32	42,9	1-2-3

Globalement, les limites de tolérance calculées pour les asthmatiques face aux extrêmes météorologiques varient entre une température nocturne de 17°C et diurne de 22°C. La situation s'accroît avec une humidité relative entre 54 et 90 %. En surveillant les prévisions météorologiques des 72 heures à venir, nous pouvons anticiper la survenue d'un épisode d'admission aux urgences pour crises d'asthme pour causes thermiques et hygrométriques. Quant au seuil anémométrique, il est égal à 5 m/s, une valeur qui peut déclencher brutalement une crise d'asthme d'emblée grave amenant à consulter aux urgences.

XII. 5. 5. Les jours de pics et types de stress météorologiques pendant la saison intermédiaire

La classification des jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal donne un seul pic lié à un stress météorologique à un seul composant, 3 pics liés à un stress météorologique à deux composants et un seul pic lié à un stress météorologique à composants multiples (Tab. 101) :

-Pics liés à un stress météorologique à un seul composant

- Un seul pic lié à un stress hygrométrique avec une humidité maximale : le 3 novembre 2011.

- Pics liés à un stress météorologique à deux composants

Deux jours de pic et deux situations de stress météorologique pendant la saison chaude :

- deux pics liés à un stress thermique et hygrométrique : d'une part, un pic avec une température minimale et une humidité minimale (le 18 octobre 2011), d'une part, un pic lié à une température minimale et une humidité minimale (le 8 novembre 2011) ;
- un pic lié à un stress thermique et anémométrique : une température maximale associée à une vitesse maximale du vent le 17 octobre 2011).

- Pics liés à un stress météorologique à composants multiples

Le pic lié à un stress météorologique à composants multiples du 7 novembre 2011 associe les extrêmes des trois paramètres météorologiques, avec un dépassement de la température minimale, l'humidité minimale et la vitesse maximale du vent.

Tableau 101 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous, les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison intermédiaire en 2009. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

Épisodes	Date des pics	Température (°C) (C1", C2")		Humidité (%) (C1", C2")		Vent (m/s) (C1', C2')
		Min	Max	Min	Max	Max
Épisode 1	17 octobre	18	21	54	90	7
	18 octobre	14	22	49	90	5
Épisode 2	3 novembre	17	22	69	94	5
Épisode 3	7 novembre	14	23	42	79	8
	8 novembre	14	23	31	79	5

XII. 6. ESTIMATION DE L'IMPACT SANITAIRE DE POLLUTION PHOTOCHIMIQUE SUR LES ADMISSIONS POUR CRISES D'ASTHME AUX URGENCES

Les asthmatiques constituent une population sensible à la pollution atmosphérique et le fait qu'ils soient de la même ville celle de Ben Arous, facilite l'estimation de leur exposition. Nous pouvons donc nous attendre à avoir une exposition spatio-temporelle homogène au sein des asthmatiques.

L'effet de la pollution de l'air sur le déclenchement des crises d'asthme sera notre objectif dans ce qui suit. Nous n'étudierons que l'effet de la pollution photochimique, car l'O₃ est le seul polluant mesuré pendant la période d'étude (du 1^{er} juin au 31 décembre 2011) dans les stations du Grand-Tunis.

Notre objectif est donc, d'étudier l'effet de l'O₃ sur les admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous. Les sujets vont être suivis sur une période de 7 mois (de façon prospective). À l'issue du suivi, les admissions quotidiennes au cours de la période

d'étude vont être analysées en relation avec les données sur la concentration horaire d'O₃.

Dans le but d'estimer les événements sanitaires pour causes respiratoires, nous analysons le nombre d'hospitalisations aux urgences et les niveaux des moyennes journalières d'O₃ pendant la saison estivale, la saison favorable à la pollution photochimique (chapitre VII).

XII. 6. 1. Analyse des indicateurs environnementaux et sanitaires et estimation des événements sanitaires évitables

Au premier lieu, nous décrivons les indicateurs environnementaux manifestés par les mesures d'O₃ en relation avec le nombre quotidien des crises d'asthme admis aux urgences de Ben Arous. Puis nous allons estimer l'exposition des asthmatiques aux concentrations d'O₃ et le nombre d'hospitalisations évitables à partir des trois scénarios. La dernière étape de la démarche permettra de déduire des normes réalistes pour la qualité de l'air basées sur la concentration d'O₃.

XII. 6. 1. 1. Pollution photochimique et admissions pour crises d'asthme

Pendant la saison chaude (juin-septembre) le pic d'admission pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous a été enregistré le 24 juin 2011 avec 3 admissions. Pendant cette saison estivale la station de la qualité de l'air du Parc Mourouj, la plus proche de la région de Ben Arous, a enregistré 6 dépassements de la valeur limite relative à la santé fixée à 235 µg/m³ et le seuil d'alerte a été déclenché 3 fois. Les dépassements du seuil tunisien ont été enregistrés entre le 17 et le 28 juin avec des valeurs variant entre 243 µg/m³ (le 24 et le 28 juin) et 349 µg/m³ (le 23 juin) (Fig. 158). En effet, la moyenne d'une heure de l'O₃ a dépassé les niveaux de pollution fixée par le seuil d'alerte plus de deux fois pendant une période de 30 jours.

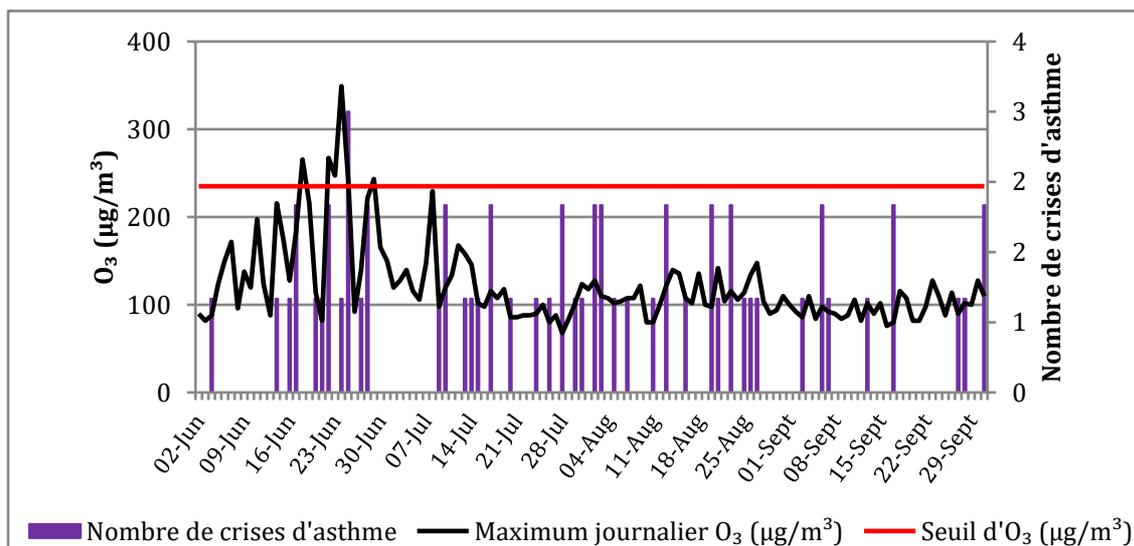


Figure 158 : Concentrations maximales d'O₃ à la station du Parc Mourouj (ANPE) et nombre de crises d'asthme à l'urgence de Ben Arous (UOCD Ben Arous) du 1^{er} juin au 30 septembre 2011.

XII. 6. 1. 2. Description des indicateurs environnementaux et sanitaires

L'analyse du tableau 102, portant sur le nombre d'hospitalisations aux urgences de Ben Arous et niveaux des moyennes journalières de l'O₃ (µg/m³) dans la station de la qualité de l'air du Parc Mourouj durant la saison chaude, du 1^{er} juin au 30 septembre 2011 :

- les niveaux moyens journaliers de l'O₃ dans le ciel du Grand-Tunis pendant la saison chaude étaient de 122 µg/m³;
- le nombre journalier moyen des admissions pour crises d'asthme pendant la saison chaude a été d'une seule admission. Une valeur similaire à la moyenne journalière de toute la période d'étude.

Tableau 102 : Nombre d'hospitalisations aux urgences de Ben Arous et niveaux des moyennes journalières de l'O₃ (µg/m³) dans la station de l'ANPE du Parc Mourouj du 1^{er} juin au 30 septembre 2011. (Source des données : ANPE et UOCD Ben Arous).

	Maximum journalier d'O ₃ (µg/m ³)	Nombre d'admissions pour crises d'asthme
Moyenne	122	1
Percentile 5	80	0
Percentile 25	92	0
Percentile 50	108	0
Percentile 75	134	1
Percentile 90	176	2
Percentile 95	229	2
Maximum	349	3
Minimum	68	0

Les distributions journalières par classe des niveaux d'exposition à l'O₃ (Fig. 159) montrent que :

- les niveaux inférieurs à 60 µg/m³ n'enregistrent aucune admission hospitalière ;
- les seuils tunisiens de la valeur guide relative au bien-être et celui recommandé par l'OMS, variant entre 150 et 200 µg/m³, en moyenne pendant une heure, représentent 8 % des jours de la saison estivale et n'enregistrent que 5 % des crises d'asthme. Tandis que, entre 80 et 150 µg/m³, juste au-dessous de ce seuil, nous enregistrons le plus grand nombre de jours d'exposition ainsi que le plus grand nombre d'admissions pour crises d'asthme (77 %) ;
- le seuil tunisien relatif à la santé fixé à 235 µg/m³ en moyenne pendant une heure, n'a été dépassé que 6 fois soit 5 % du total de la période et a représenté 10 % du nombre de crises d'asthme.

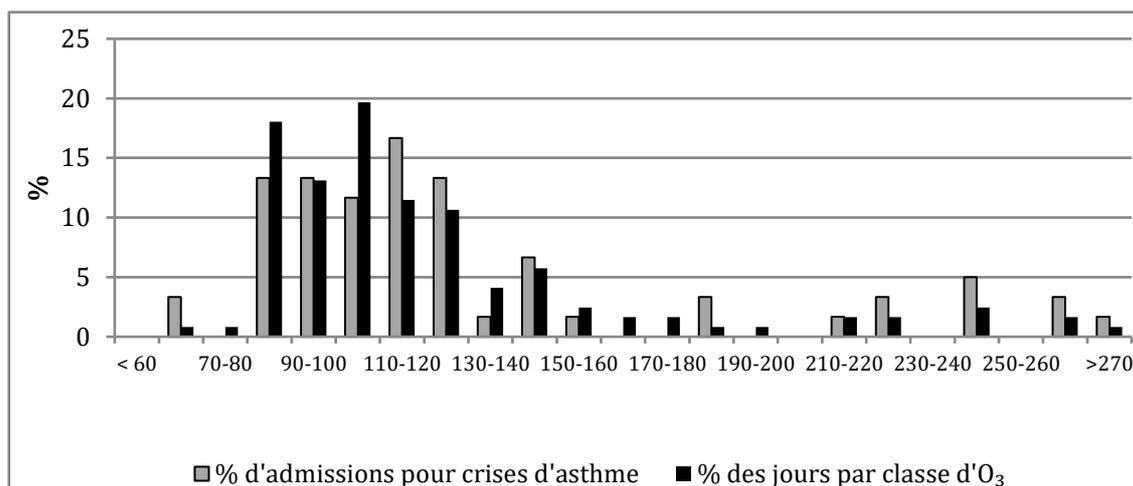


Figure 159 : Distribution par classes des niveaux journaliers d'exposition et des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous pour chaque niveau d'O₃ observé de la période juin-septembre 2011 à la station du parc Mourouj. (Source des données : UOCD Ben Arous et ANPE).

XII. 6. 1. 3. Estimation des évènements sanitaires évitables

Trois scénarios estiment la relation entre l'exposition à la pollution photochimique en calculant le nombre d'hospitalisations évitables pendant la saison chaude (juin-septembre) :

Scénario 1

Si le niveau de pollution avait été celui de 5 % des jours les moins pollués (80 µg/m³) on aurait évité 54 hospitalisations.

Scénario 2

Si le niveau moyen d'exposition pendant ces 4 mois (122 µg/m³) était ramené à 91,5µg/m³ (réduction de 25 %), on éviterait 48 consultations.

Scénario 3

Si les niveaux d'exposition des jours les plus pollués (P75 : 134 µg/m³) étaient ramenés à P25 (80 µg/m³), niveaux les moins pollués, le nombre de consultations évitées serait de 42.

XII. 6. 1. 4. Etablissement des valeurs guides de la qualité de l'air en ozone

L'analyse des indicateurs d'O₃ en relation avec les admissions aux urgences de Ben Arous nous a permis de conclure qu'il y'a une association significative entre la pollution photochimique et la recrudescence des crises d'asthme.

Après la quantification du risque des admissions hospitalières, nous pouvons déduire des normes réalistes pour la qualité de l'air basée sur la concentration de l'O₃. Cet indice, applicable au Grand-Tunis ainsi qu'à toutes les villes tunisiennes, varie sur une échelle allant de 1 à 10 (Très bon pour l'indice 1 à exécration pour l'indice 10) (Tableau 103). Les indices de 1 à 4 inférieures à 90 µg/m³, sont excellents à assez bons ; les indices de 5 à

7, allant de 90 à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sont moyens à très médiocres et les indices de 8 à 10, allant de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et plus, sont très mauvais à exécration pour la santé respiratoire.

Tableau 103 : Niveau de l'indice de la qualité de l'air en O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (ANPE) pour le Grand-Tunis.

Sous-indice	Qualificatif	Moyenne horaire d' O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	Excellent	< 60
2	Très bon	60-70
3	Bon	70-80
4	Assez bon	80-90
5	Moyen	90-122
6	Médiocre	122-133
7	Très médiocre	134-150
8	Mauvais	150-190
9	Très mauvais	190-220
10	Exécration	> 220

XII. 6. 2. Pic de pollution photochimique et impact sur les asthmatiques

Le pic d'admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous, pendant la saison chaude (juin-septembre) a été le 24 juin avec 3 crises. L'analyse de la qualité de l'air de cette journée montre qu'elle a été très dégradée. En effet, du 21 au 24 juin, les concentrations d' O_3 à la station de la qualité de l'air du « Parc Mourouj » ont atteint des niveaux record avec 4 dépassements de la norme tunisienne relative à l' O_3 (235 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valeur limite relative à la santé moyenne sur une heure) : le 21 juin 268 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 22 juin 248 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, le 23 juin 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et le 24 juin 244 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces dépassements ont déclenché le seuil d'alerte 3 fois. Selon nos nouvelles normes, cet épisode atteint l'indice 10 correspondant au niveau exécration, la limite supérieure de l'objectif de la qualité de l'air (Fig. 160).

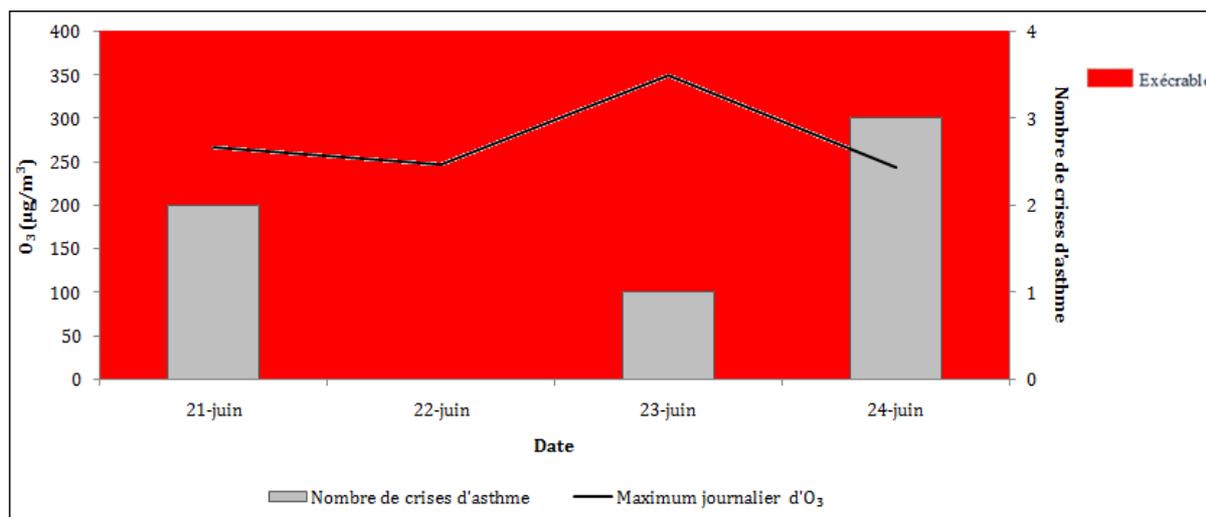


Figure 160 : Maximum journalier d'O₃ à la station du Parc Mourouj (ANPE) et nombre de crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) du 21 au 24 juin 2011.

- Un épisode photochimique lié à un temps anticyclonique chaud associé aux brises marines

L'examen fin de la température de l'épisode du 21 au 24 juin, montre une température très élevée oscillant entre 18°C (le 21 et le 22 juin) et 37°C (le 23 juin). Le 23 et le 24 juin ce sont des jours paroxysmiques de « forte chaleur », la température minimale a été de 20°C et la température maximale a été de 36°C le 23 juin et le 24 juin la minimale a été de 21°C et la maximale de 33°C. Donc, 4 jours très chauds avec deux jours paroxysmiques enchainés par des nuits tropicales au cours desquelles les températures ne sont jamais descendues en deçà de 20°C qui arrivaient même à 27°C et les températures maximales oscillaient entre 30°C et 36°C (Fig. 161). Ces jours sont très secs la journée et relativement humides les premières heures du matin. Le maximum de l'humidité relative est atteint le 22 juin à 5h avec une valeur de 94 %. Ces journées chaudes et sèches se caractérisaient par un ciel très dégagé favorisant un rayonnement solaire très intense et une durée d'ensoleillement importante durant ces journées les plus longues de l'année.

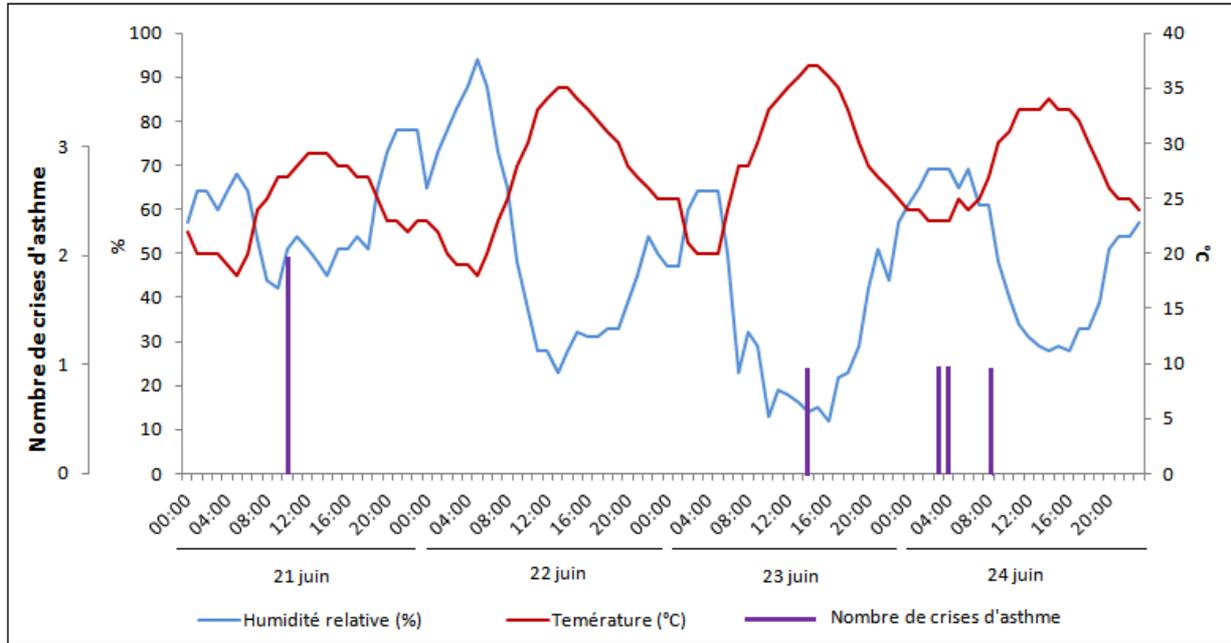


Figure 161 : Moyenne horaire de l'humidité relative de l'air (en %) et de la température de l'air ambiant (en °C) à la station de Tunis-Carthage (INM) ; nombre de crises d'asthme (UOCD Ben Arous) du 21 au 24 juin 2011.

Deux roses du vent horaires instantanées par tranche de vitesses l'une représente l'épisode des 4 jours allant du 21 au 24 juin (Fig. 162. A) et la deuxième représente seulement les deux jours du 23 et 24 juin (Fig. 162. B). La fréquence du calme représente, 15 % du total des observations du 23 et 24 juin et il est de 16 % du 21 au 24. Il a été enregistré aux premières heures du matin (de 1h à 6h). Tandis qu'il y'a absence totale du vent fort (8 m/s et plus) durant les 4 jours.

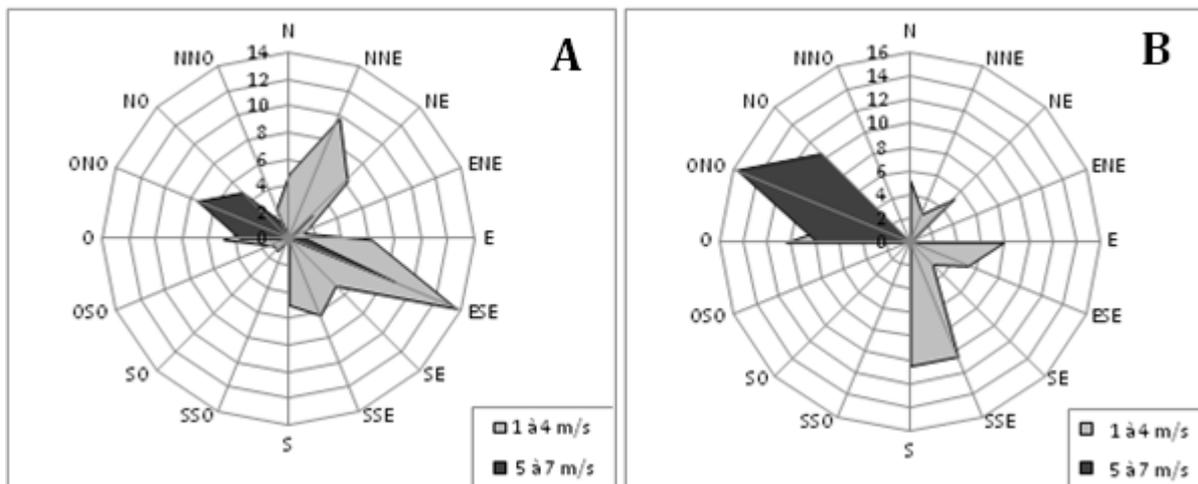


Figure 162 : Pourcentage de la direction du vent instantané par tranche de vitesses du 21 au 24 juin et du 23 et 24 juin à la station de Tunis-Carthage (Weather Underground).

Les vents de la tranche de vitesse 1 à 4 m/s (vent faible à modéré) prédominent pour les deux roses du vent, ils soufflent principalement des secteurs ESE et NNE durant les 4 jours (21-24 juin) et des secteurs SSE et W pendant les 23 et 24 juin. Ces vents soufflant

des secteurs orientaux, de la direction de la Méditerranée, sont à l'origine du taux hygrométrique relativement élevé durant ces jours là. La fréquence croissante des vents des secteurs S, SSE et ESE justifie la forte température pendant ces journées estivales.

L'examen de l'état synoptique relatif au 21 et 24 juin 2011 montre que le nord de la Tunisie est dominé, en surface par une situation de marais barométrique avec un haut géopotentiel en altitude. Le vent synoptique est très faible, le ciel et le fort ensoleillement permettent à la brise thermique de s'installer (Fig. 163).

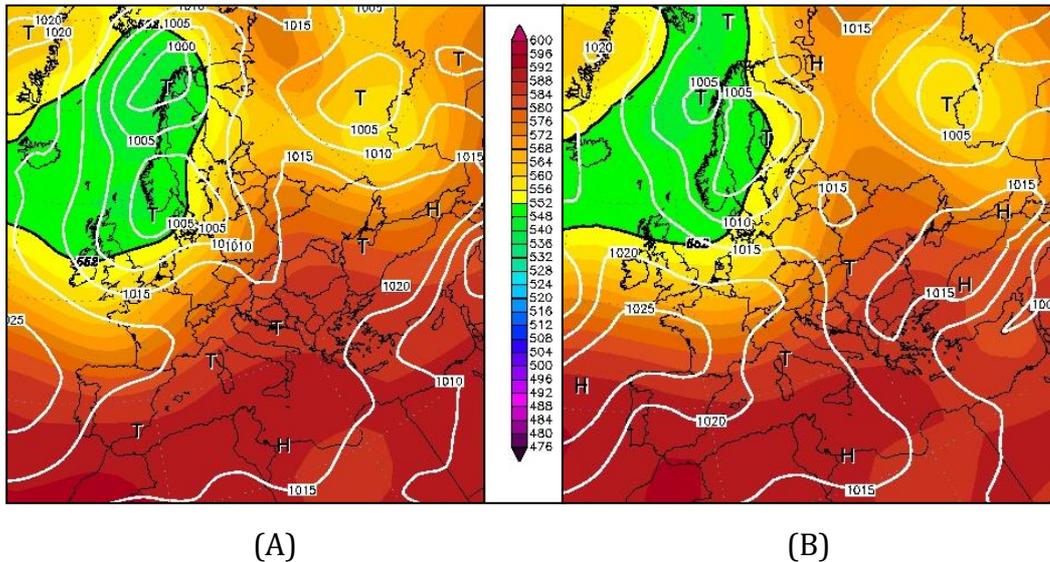


Figure 163 : Surface isobarique 500 hPa (en décimètre) et pression atmosphérique au sol (en hPa) le 23 (A) et le 24 juin 2011 (B) à 00h. (Source : *wetterzentrale.de*).

La nuit du 21, 22 et du 23 juin, le vent a soufflé de la terre avec une vitesse relativement faible variant entre calme et 3,6 m/s avec un changement de direction le jour et la nuit (Fig. 164). C'est donc une brise thermique littorale.

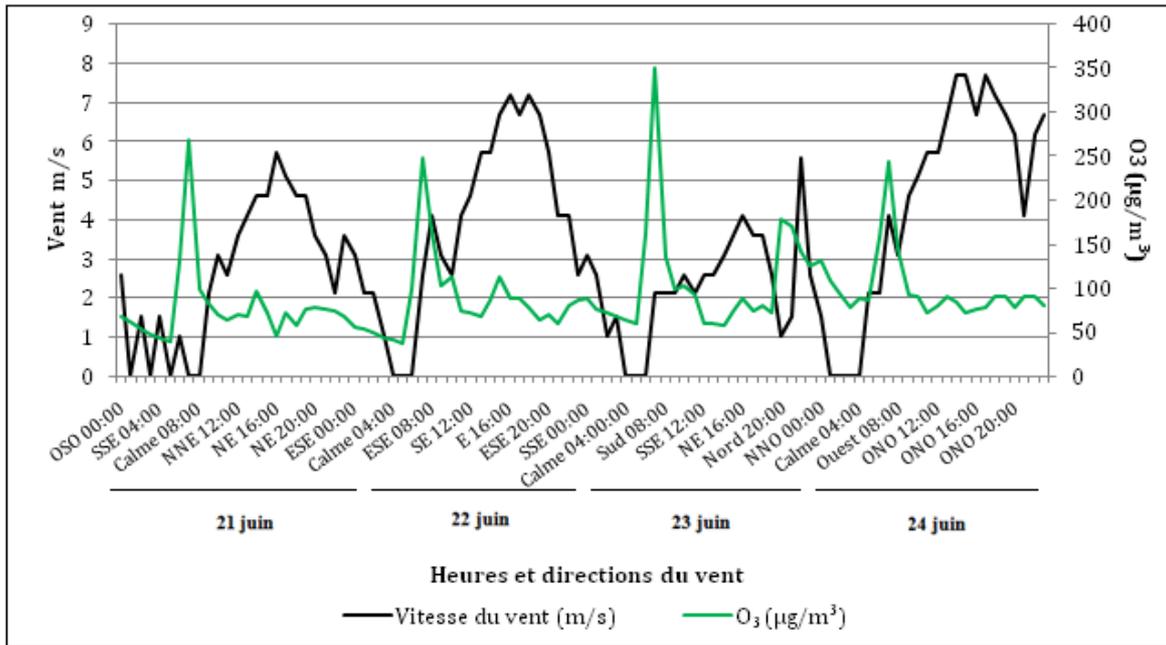


Figure 164 : Taux d'O₃ (µg/m³) (ANPE), vitesse (en m/s) et direction du vent à la station de Tunis-Carthage (Weather Underground), du 21 au 24 juin 2011.

En effet, toutes les conditions météorologiques étaient réunies pour favoriser d'une part la formation de l'ozone (température élevée et durée d'ensoleillement importante avec la présence obligatoire des polluants primaires) et d'autre part l'accumulation de l'O₃ (vent majoritairement faible à modéré), polluant très délétère pour la santé respiratoire et des asthmatiques particulièrement.

- Population à risque

La population des asthmatiques sensible face à cette pollution photochimique, qui a marqué l'épisode du 21 au 24 juin 2011, a été âgée entre 18 et 52 ans. Nous comptons 4 femmes et deux hommes (Tab. 104), parmi eux deux seulement ont affirmé que le déclenchement de la crise a été à cause à l'exposition aux échappements des véhicules et de la pollution industrielle, tandis que les autres ignorent la cause de déclenchement de leurs crises.

Tableau 104 : Nombre d'asthmatiques aux urgences de Ben Arous, du 21 au 24 juin 2011, selon le genre et la catégorie d'âge. (Source des données : UOCD Ben Arous).

Genre / Catégories d'âge	Femme	Homme	Total
0-44	2	2	4
45-64	2	0	2
65 et plus	0	0	0
Total	4	2	6

XII. 7. TYPES DE TEMPS DES JOURS DE PICS DES ADMISSIONS POUR CRISES D'ASTHME

Deux types de temps sont caractéristiques des jours de pics pour crises d'asthme : l'un froid et humide caractérisé par une baisse marquée de la pression atmosphérique pendant la saison froide le 16 décembre 2011 (7 crises d'asthme), l'autre anticyclonique et associé aux brises marines lié à un épisode photochimique pendant la saison estivale.

XII. 7. 1. Temps hivernal lié à un stress hygrométrique associé à une baisse marquée de la pression atmosphérique combinée à une masse d'air froid

Le jour de pic quia enregistré le plus grand nombre d'admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous, pendant la saison froide, est le 16 décembre 2011 avec 7 crises. Un jour précédé par un stress météorologique lié uniquement à un extrême hygrométrique.

L'indicateur biométéorologique thermique est moyenné sur deux jours. En effet, l'examen fin de l'ambiance thermique montre une ambiance fraîche ($T_{max} + T_{min} = 30$) sur les deux jours, jour de pic et le jour précédent. Cette ambiance fraîche est à la norme des seuils biométéorologiques thermique de la saison fixés à 9°C pour la température minimale et 19°C pour la température maximale (Fig. 165).

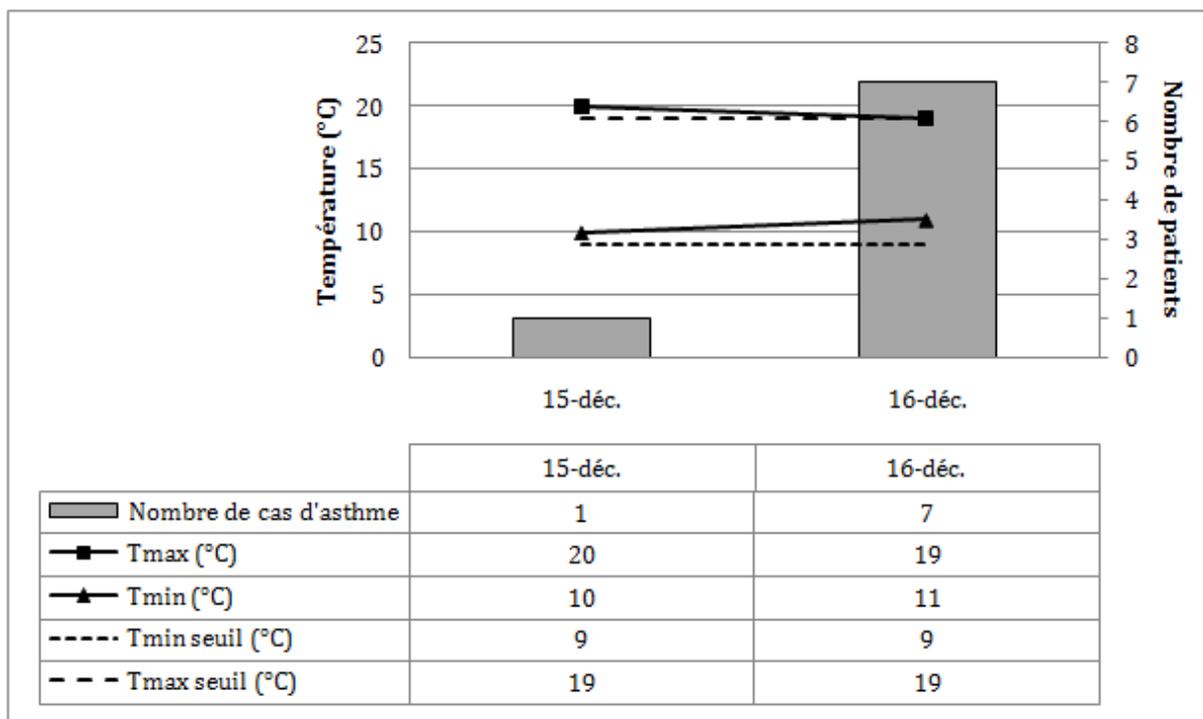


Figure 165 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) et des températures (minimale et maximale) (en °C) (Weather Underground) le 15 et 16 décembre 2011.

La plus ample fluctuation thermique tri-horaire entre le 15 et le 16 décembre 2011 a été enregistrée le 15 décembre entre 10h et 13h avec une hausse de 4°C et entre 19h et 22h. Des faibles fluctuations qui ne peuvent pas être la cause du pic du 16 décembre 2011 (Tab. 105).

Tableau 105 : Les fluctuations thermiques (°C) tri-horaires du 15 et 16 février 2011. (Source des données : Weather Underground).

Date Période tri-horaire	15 décembre	16 décembre
1h-4h	0	- 1
4h-7h	- 1	- 2
7h-10h	2	2
10h-13h	4	2
13h-16h	- 2	1
16h-19h	- 2	- 3
19h-22h	- 4	- 2

L'examen de l'humidité relative montre un léger dépassement du seuil hygrométrique de l'indicateur (C1", C2" : Hmin > 51 % et Hmax > 92 %) avec une valeur de 56 % pour l'humidité minimale et 92 % pour l'humidité maximale. Tandis que les extrêmes hygrométriques du 14 et du 16 décembre ont été en dessous des normes (Fig. 166). La moyenne maximale de l'humidité relative, du 15 décembre 2011 a dépassé légèrement le seuil.

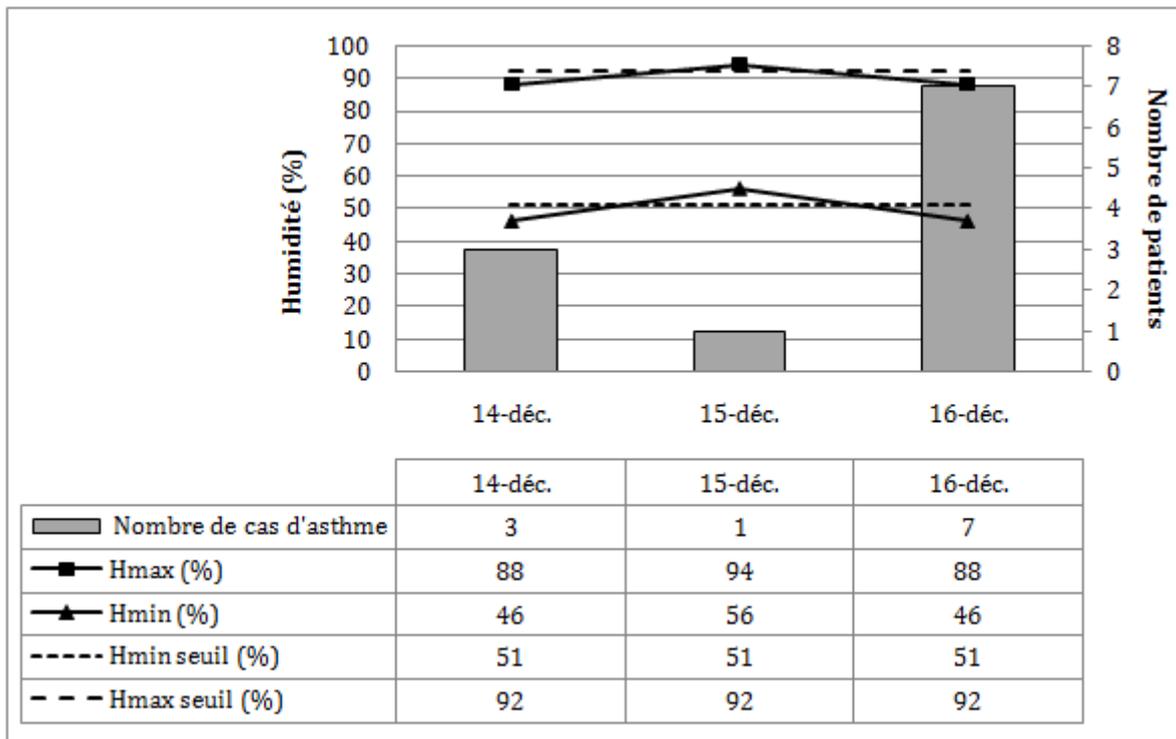


Figure 166 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) et de l'humidité relative de l'air (minimale et maximale) (en %) (Weather Underground) du 14 au 16 décembre 2011.

Cet épisode hivernal, du 14 au 16 décembre 2011, a été frais et très humide avec une agression météorologique extrême liée à l'humidité relative, un dépassement du seuil limite hygrométrique, un facteur qui peut être à l'origine de déclenchement des crises d'asthme. En effet, le 16 décembre 2011, deux crises d'asthme ont été enregistrées aux urgences de Ben Arous à 8 h, ces crises étaient influencées par la température matinale basse et la forte humidité relative de l'air (Fig. 167).

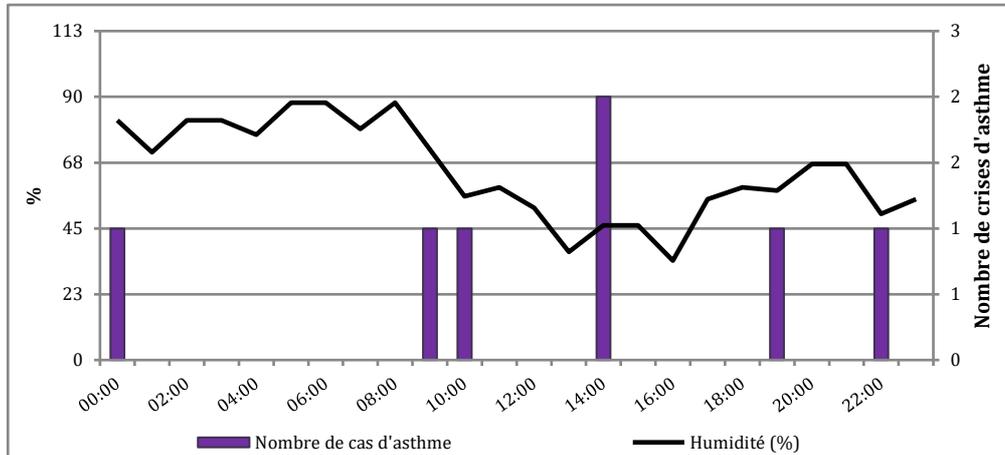


Figure 167 : La température horaire (en °C) (A) et l'humidité relative horaire (B) (en %) à la station de Tunis-Carthage (*Weather Underground*) et le nombre de crises d'asthme (*UOCD Ben Arous*) le 16 décembre 2011.

Du 14 au 16 décembre 2011, la plus ample fluctuation hygrométrique a été de 18 % dans le sens de la baisse enregistrée le 15 décembre entre 10h et 13h (Tab. 106). Malgré cette fluctuation élevée, elle ne peut pas causer des gênes respiratoires car elle reste bien loin du seuil à risque fixé par Rivolier (30 %) ou même celui déduit dans notre étude et fixé à 20 %.

Tableau 106 : Les fluctuations hygrométriques (%) tri-horaires du 14 au 16 décembre 2011. (*Source des données : Weather Underground*).

Date	14 décembre	15 décembre	16 décembre
Période tri-horaire			
1h-4h	11	8	0
4h-7h	0	5	11
7h-10h	- 6	- 10	- 10
10h-13h	2	- 18	- 11
13h-16h	- 3	- 4	- 3
16h-19h	17	7	13
19h-22h	20	19	8

Quant au vent, il a respecté le seuil fixé par l'indicateur (C1"C2" : $V_{max} > 8\text{m/s}$) avec une moyenne sur 3 jours de 6 m/s. Le vent a été plus fort le 15 décembre 2011 avec 7 m/s (Fig. 168).

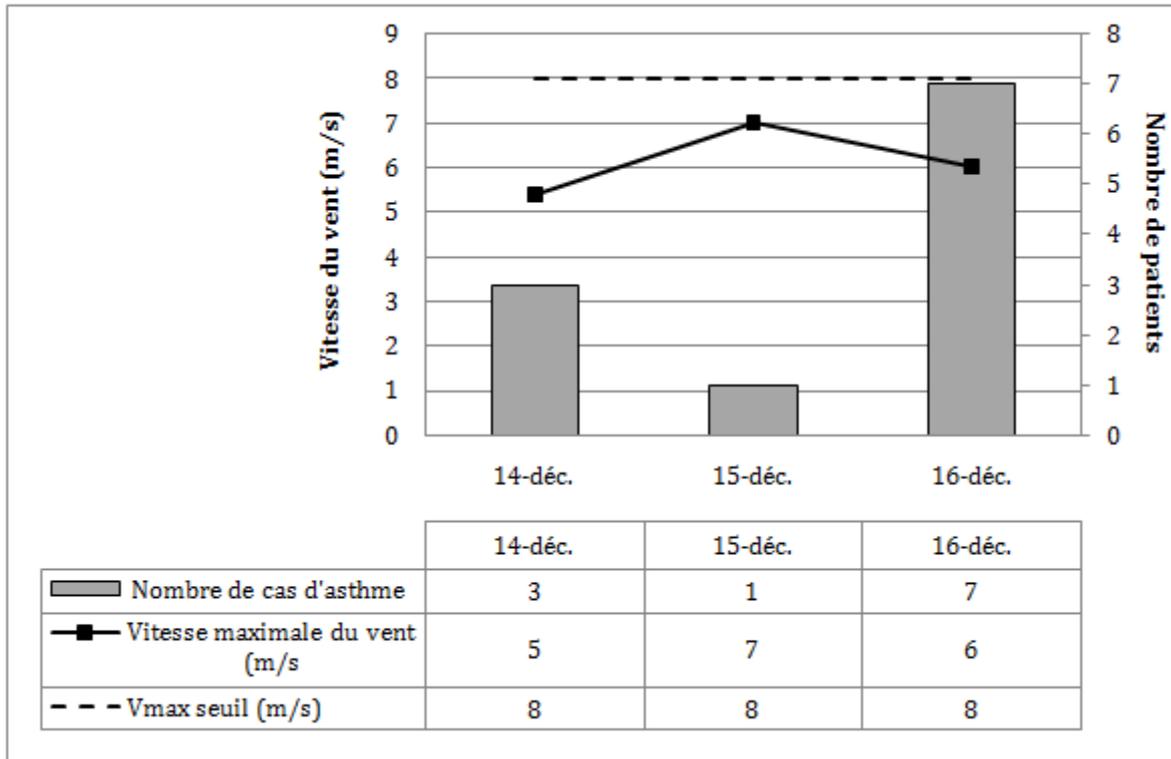


Figure 168 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences de Ben Arous (*UOCD Ben Arous*) et la vitesse maximale du vent (en m/s) (*Weather Underground*) du 14 au 16 décembre 2011.

Durant le 15 et le 16 décembre, le vent soufflait essentiellement des secteurs W et S. Le vent modéré (2 à 4 m/s) prédomine avec 75 % et 73 % du total des vitesses, respectivement le 15 et 16 décembre. Le vent moyennement fort (5 à 7 m/s) représente 16 % le 15 décembre avec 9 % de situations calmes et 27 % le 16 décembre (Fig. 169).

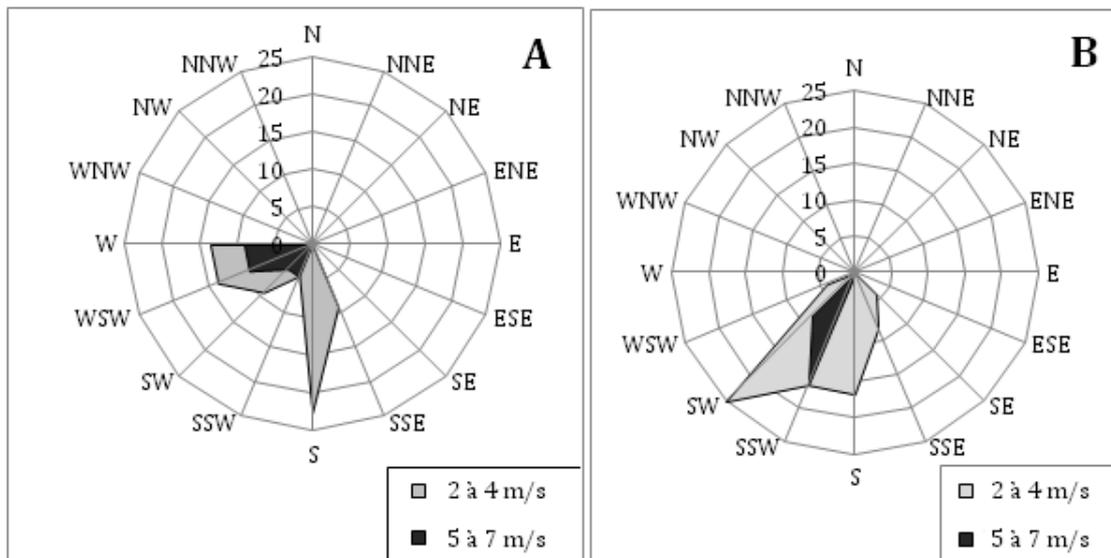


Figure 169 : Direction du vent instantané par tranche de vitesses du 15 (A) (9 % de situations calmes) et 16 (B) décembre 2011 à la station de Tunis-Carthage (*Weather Underground*).

D'autres facteurs météorologiques peuvent aussi aggraver la situation des asthmatiques comme ce fût le cas le jour de pic du 16 décembre qui a été marqué par une baisse de la pression barométrique (Ben Romdhane *et al.*, 2015). Si 2 crises d'asthme ont été enregistrées à la suite de la forte humidité relative, 5 crises (à 12h, 14h, 20h et 22h) ont été le résultat d'une baisse marquée de la pression atmosphérique durant toute la journée (elle est passée de 1025 hPa à 10h à 1013 hPa à 22h) combinée avec une masse d'air froid venant du secteur nord. (Fig. 170). Une situation démontrée par un autre chercheur (Simoneau, 2015).

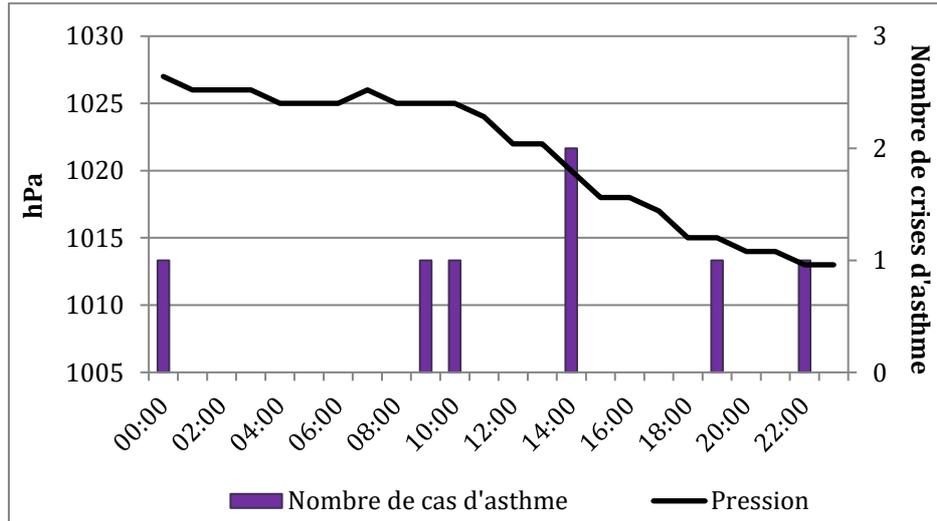


Figure 170 : Le nombre de crises d'asthme (UOCD Ben Arous) et pression atmosphérique horaire (en hPa) à la station de Tunis-Carthage (*Weather Underground*) le 16 décembre 2011.

La situation synoptique du 16 décembre 2011, entre minuit et 15h, la Tunisie est soumise à un vent de SW à SSW qui s'écoule le long des marges méridionales d'une dorsale reliant l'anticyclone des Açores à un autre centre sur le nord de l'Algérie traversant ainsi la Méditerranée selon un axe orienté SE. (Fig. 171).

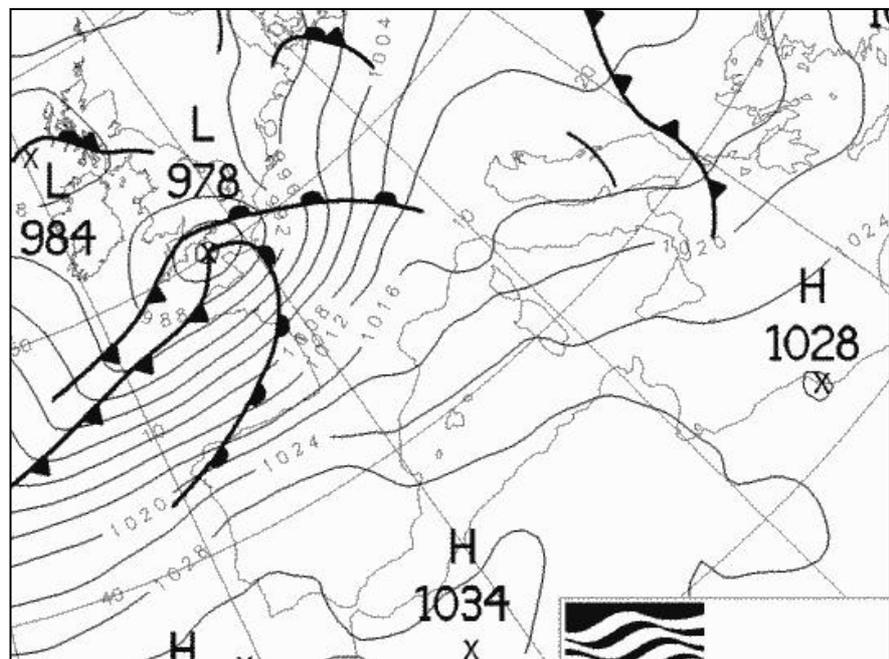


Figure 171 : Carte de pression au sol du 16 décembre 2011.
(Source : *wetterzentrale.de*).

XII. 7. 2. Temps perturbé associé à un stress thermique et anémométrique

Le plus grand nombre d'admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous, durant la saison intermédiaire 2011 a été au nombre de 6, enregistré le 17 octobre après trois jours d'absence d'admissions pour crises d'asthme. C'est un pic lié à un stress météorologique à deux composants : thermique et anémométrique.

L'analyse des caractéristiques thermiques extrêmes du jour de pic et les deux jours qui précèdent permet de constater une température minimale qui stagne au-dessus du seuil optimal fixé à 17°C avec une moyenne sur 3 jours de 15°C selon l'indicateur (C1", C2") moyenné sur 3 jours. En effet, la température minimale baisse du 16°C le 15 octobre à 14°C le 17 octobre soit une variation de -2°C (Fig. 172). La température maximale a été à la norme (22°C) le 16 et 17 octobre et a été légèrement en dessous le 15 octobre avec 20°C.

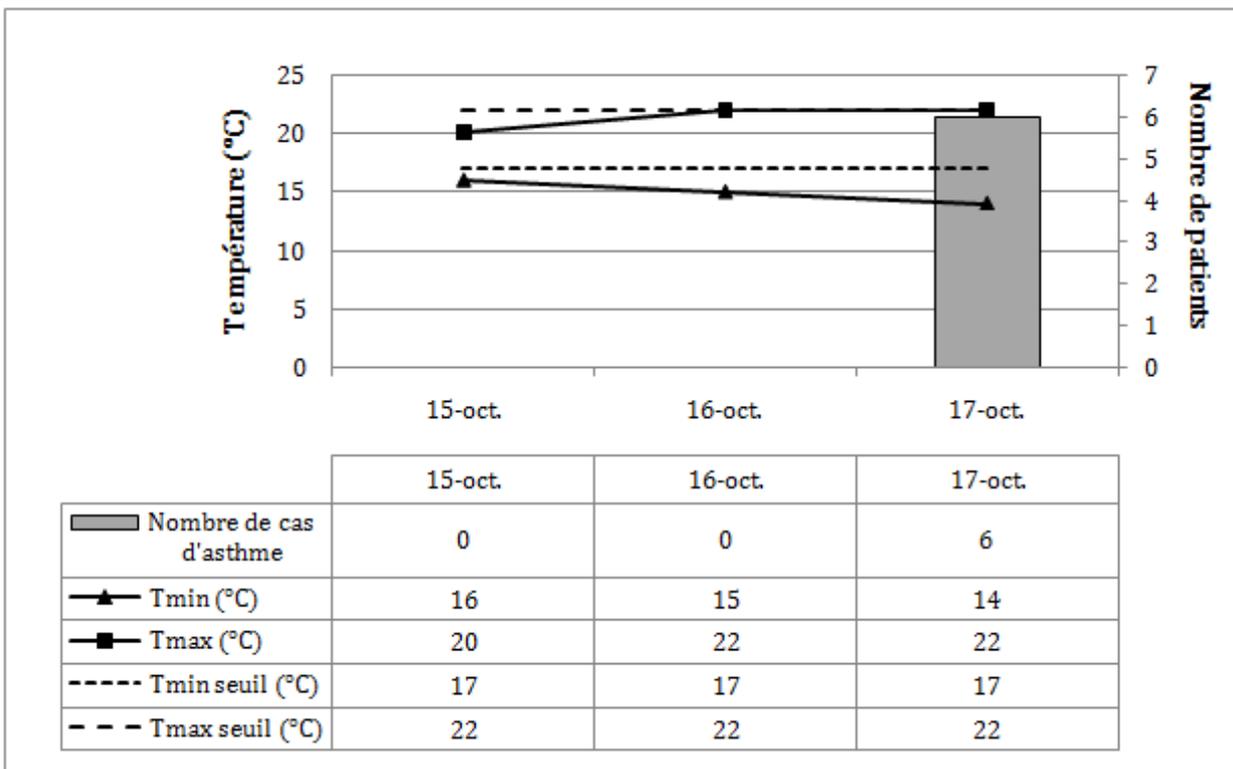


Figure 172 : Evolution des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et des températures (minimale et maximale) (en °C) du 15 au 17 octobre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

La plus grande variabilité thermique tri-horaires pendant les trois jours a été de 3°C, dans le sens de la hausse le 15 octobre à 13h-16h et dans le sens de la baisse le 16 octobre de 16h à 19h. En effet, une fluctuation très faible pour déclencher de crises d'asthme (Tab. 107).

Tableau 107 : Les fluctuations thermiques (°C) tri-horaires du 15 au 17 octobre 2011. (Source des données : Weather Underground).

Date Période tri-horaire	15 octobre	16 octobre	17 octobre
1h-4h	1	-1	-1
4h-7h	0	-1	0
7h-10h	-1	4	1
10h-13h	1	0	1
13h-16h	3	0	-1
16h-19h	1	-3	-2
19h-22h	0	-1	-2

En ce qui concerne l'humidité relative minimale, elle a été légèrement en dessous du seuil hygrométrique fixé à 54 %, le 16 et 17 octobre 2011, avec des valeurs respectivement 49 % et 53 %. Quant à la l'humidité maximale, elle a dépassé le seuil optimal (90 %) le 15 octobre avec une valeur de 94 % (Fig. 173).

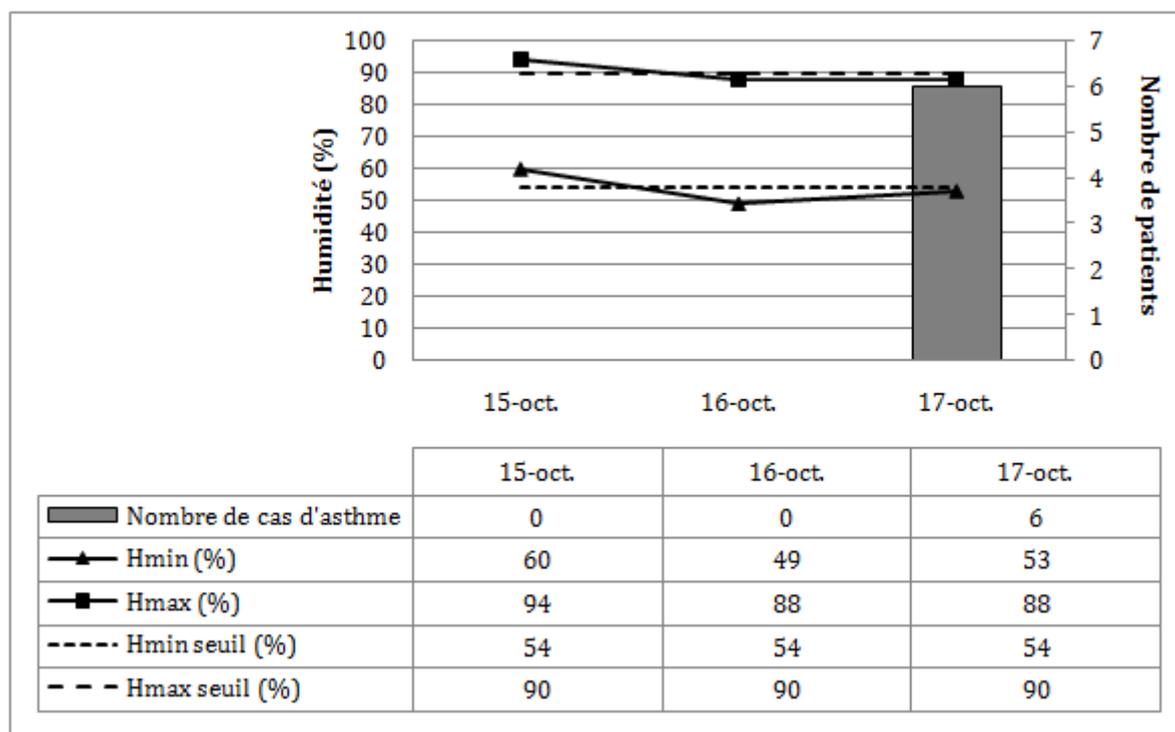


Figure 173 : Evolution des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et de l'humidité relative de l'air ambiant (minimale et maximale) (en %) du 15 au 17 octobre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

La plus ample fluctuation hygrométrique a été de 22 % dans le sens de la baisse enregistrée le 16 octobre entre 7h et 10h (Tab. 108). Une fluctuation élevée qui peut causer des gênes respiratoires et déclencher des crises d'asthme.

Tableau 108 : Les fluctuations hygrométriques (%) tri-horaires du 15 au 17 octobre 2011. (Source des données : INM).

Date Période tri-horaire	15 octobre	16 octobre	17 octobre
1h-4h	10	16	4
4h-7h	0	8	0
7h-10h	1	-22	5
10h-13h	7	13	-8
13h-16h	-10	9	-3
16h-19h	-8	18	16
19h-22h	9	7	10

Quant au vent, il a été en dessus du seuil anémométrique fixé par l'indicateur (C1', C2' : $V_{max} > 5 \text{ m/s}$) avec une moyenne sur les deux jours, jour de pic et le jour qui précède, de $6,5 \text{ m/s}$ (Fig. 174).

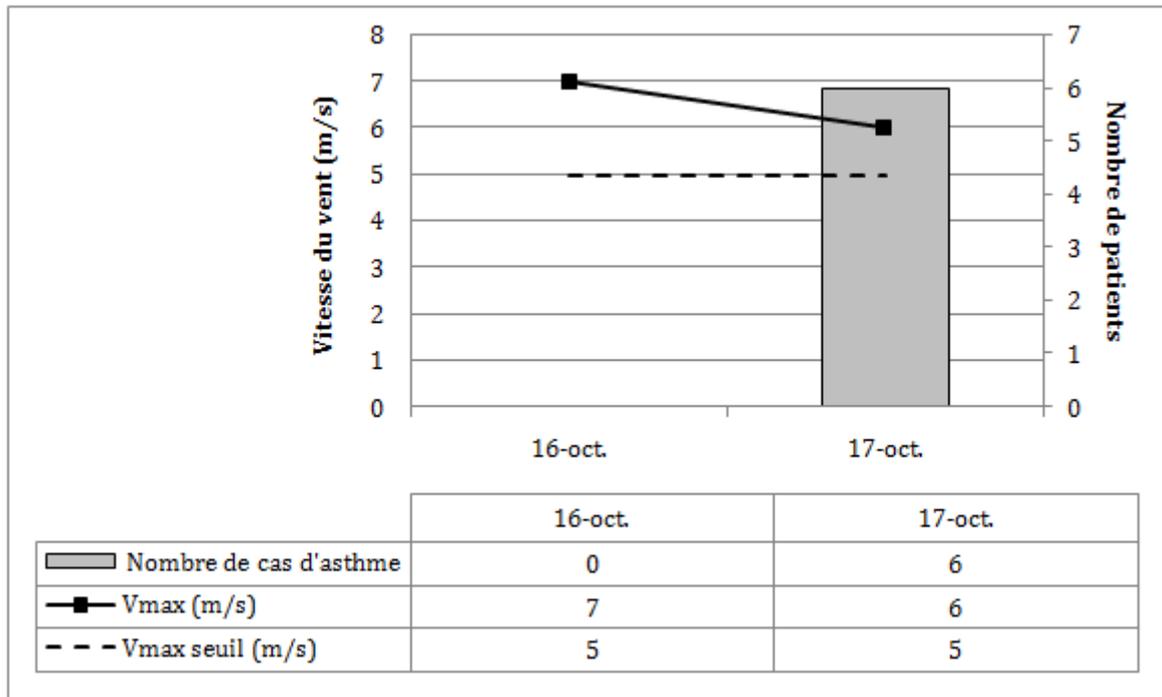


Figure 174 : Evolution des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et de la vitesse maximale du vent (en m/s) du 16 et 17 octobre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).

La situation atmosphérique, du 16 et 17 octobre 2011, est caractérisée par un type de temps anticyclonique, le Grand-Tunis est sous l'influence d'un vent de N ou NW qui souffle sur les marges orientales d'un anticyclone situé à l'est de la Tunisie (Fig. 175 et 176).

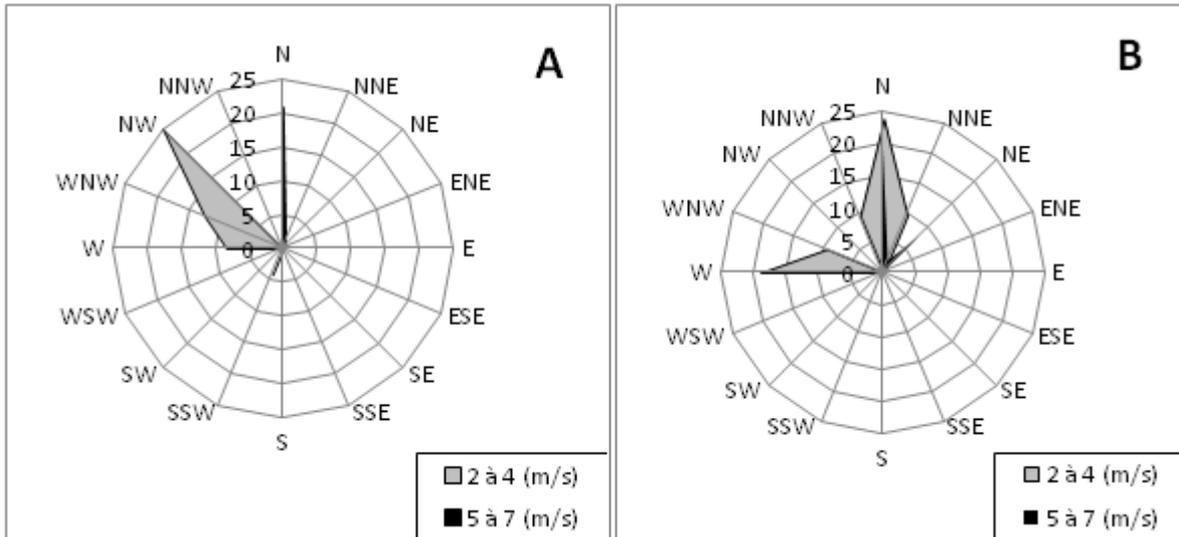


Figure 175 : Direction du vent instantané par tranche de vitesses du 16 (A) (13 % de situations calmes) et 17 (B) octobre 2011 à la station de Tunis-Carthage (*Weather Underground.com*).

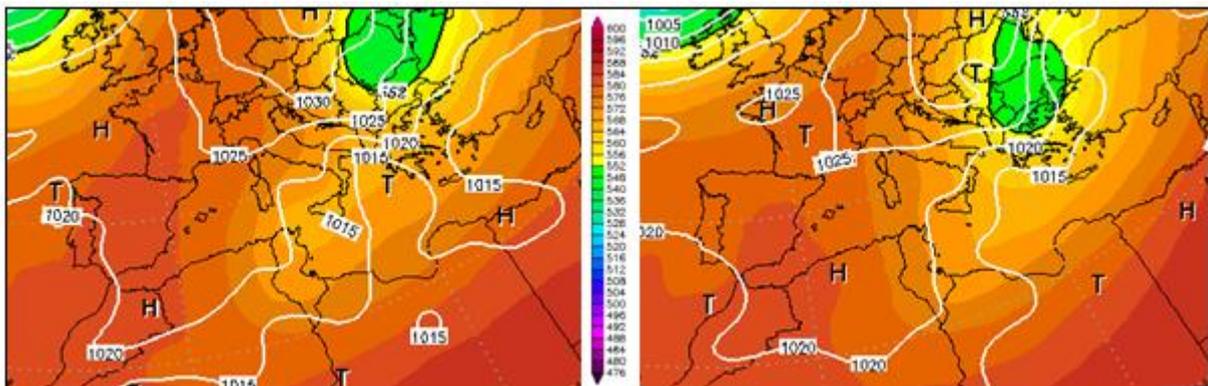


Figure 176 : Surface isobarique 500 hPa (en décamètre) et pression atmosphérique au sol (en hPa) le 16 (à gauche) et le 17 (à droite) octobre 2011. (*Source : Wetterzentrale.de*).

En conséquence, ces conditions météorologiques ont été la cause de 6 crises d'asthme admis aux urgences de Ben Arous, 4 femmes et 2 hommes âgés entre 26 et 43 ans. Les crises ont été survenues entre 12h et minuit à domicile des patients (Fig. 177). Une crise a été déclenchée à cause des corticoïdes inhalés, une autre a été à cause d'une infection respiratoire, tandis que quatre asthmatiques accusent le froid d'être le facteur déclenchant de leurs crises. Ces crises ont été survenues entre 20h et minuit et ce à cause du dépassement du seuil de la température minimale fixé à 17°C.

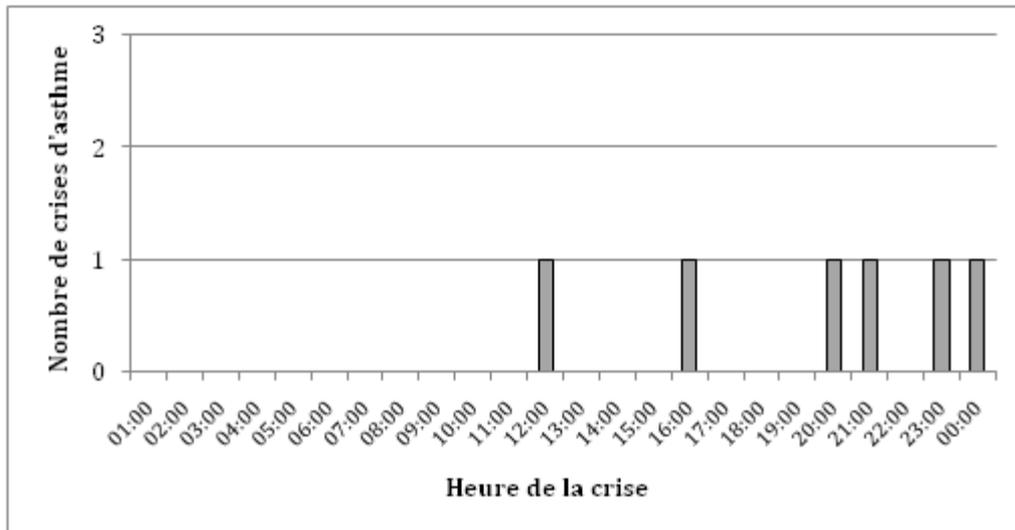


Figure 177 : Nombre et heure de la crise d'asthme admis aux urgences de Ben Arous, le 17 octobre 2011 (UOCD Ben Arous).

La situation a été légère pour un patient et modérée pour deux cas et grave pour les trois autres patients. Pour les crises à cause du froid elles ont été plutôt modérées pour deux patients qui se sont retournés chez eux après 5h et 9h d'hospitalisation et pour les deux cas graves ils ont nécessité une hospitalisation à l'UHCD et à la médecine externe de l'hôpital régional de Ben Arous.

CONCLUSION

L'étude prospective sur les caractéristiques épidémiologiques et bioclimatiques des crises d'asthme a révélé la sensibilité de cette pathologie envers l'environnement. En effet, les conditions météorologiques et la pollution de l'air sont des facteurs majeurs pour déclencher des crises d'asthme.

Le plus grand nombre des crises sont enregistrées durant la saison automnale (octobre et novembre) et surtout au début de l'hiver (décembre).

Globalement, les limites de tolérance pendant la saison intermédiaire calculées pour les asthmatiques dans le Grand-Tunis, varient entre une température minimale de 18°C et une température maximale de 25°C. Le stress climatique s'accroît avec une humidité relative entre 50 % et 90 %. En effet, après 24h on peut s'attendre à une hausse des visites aux urgences pour crises d'asthme. Quant au seuil de la vitesse maximale du vent, il est égal à 5 m/s, une valeur qui peut déclencher brutalement une crise d'asthme d'emblée grave même après 72h. Durant la saison froide, les limites de tolérance varient entre une température minimale de 9°C et une température maximale de 19°C le jour même. Néanmoins, après 48h d'une humidité relative inférieure à 51 % ou supérieure à 92 % et une vitesse maximale du vent supérieure à 7 m/s, on peut prévoir une hausse des visites aux urgences pour crises d'asthme.

L'estimation de l'exposition des asthmatiques aux concentrations d'O₃, seul polluant mesuré pendant la période d'étude et le nombre d'hospitalisations évitables à partir des trois scénarios, nous ont permis de déduire des normes réalistes pour la qualité de l'air dans le Grand-Tunis basées sur la concentration d'O₃.

Trois types de temps aggravants pour les asthmatiques : temps succédant à un extrême hygrométrique simple associé à une baisse marquée de la pression atmosphérique combinée à une masse d'air froid pendant la saison froide et un temps anticyclonique associé à un stress climatique double, thermique et anémométrique pendant la saison intermédiaire. Pendant la saison chaude, c'est plutôt un temps chaud associé aux brises marines et un épisode photochimique.

Chapitre XIII : Les facteurs de risque environnementaux pour la santé respiratoire et la particularité de l'allergie dans le Grand-Tunis

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux facteurs irritants le système respiratoire à partir des informations dégagées de notre étude prospective aux urgences de Ben Arous et à partir de notre propre enquête qui a intéressé des personnes atteintes d'une pathologie respiratoire. Nous nous intéressons aussi au rôle que jouent le niveau socio-économique du patient et son influence sur la maladie respiratoire. Nous nous servirons également, des données des consultations externes de La Rabta pour l'étude de l'allergie et sa particularité comme pathologie respiratoire.

XIII. 1. PRESENTATION DE L'ENQUETE SPECIALISEE

Nous avons réalisé une enquête spécialisée entre 2011 et 2012, sous forme d'un questionnaire. Une majorité des patients ont été rencontrés à l'hôpital Abderrahmen Mami dans l'unité d'immuno-allergologie ou dans les consultations externes, mais aussi, dans d'autres endroits là où je trouve une personne atteinte d'une pathologie respiratoire. Au total, nous avons pu colliger 130 patients.

XIII. 1. 1. Population à majorité masculine et âgée

Parmi les patients interrogés, nous distinguons 89 hommes et 41 femmes. L'âge médian des patients est de 52 ans et les extrêmes varient de 6 à 86 ans. Pour les plus jeunes, ils sont accompagnés de leurs mères qui répondent aux questions ou remplissent les fiches.

La majorité des patients sont originaires des gouvernorats de Tunis et de l'Ariana avec 33 % du total des patients chacun, 19 % de La Manouba et 15 % de Ben Arous. Tandis que les patients admis aux urgences de Ben Arous sont tous originaires du gouvernorat de Ben Arous.

XIII. 1. 2. Les pathologies respiratoires recensées

Onze types de pathologies respiratoires recensés dans le questionnaire (Tab. 109). Les patients consultants dans les consultations externes présentent la plus grande variété de pathologies, tandis que les patients rencontrés dans le service d'allergologie sont soit des asthmatiques, soit des allergiques qui consultent régulièrement. Tous les patients interviewés, asthmatiques et allergiques, ont réalisé un bilan allergologique. Ce dernier est basé sur des tests cutanés par la méthode de « *pick test* ». Le *pick test* ou les tests allergologiques cutanés, c'est la méthode fiable pour déterminer si le patient présente

une sensibilisation allergique à un élément donné faisant intervenir des données IgE³ (Heinzerling *et al.*, 2013).

Tableau 109 : les pathologies recensées dans le questionnaire. (Source des données : enquête spéciale).

Type de pathologie	Nombre de cas	% du nombre total des patients
Asthme	43	33
Allergie	27	21
DDB	8	6
BPCO	30	23
Bronchite chronique	9	7
Pneumothorax	6	5
Pneumopathie	3	2
Douleur thoracique	1	1
Pleurésie	1	1
Silicose	1	1
Hémoptysie	1	1
Total	130	100

Les facteurs de risque associés à la survenue ou à l'aggravation de ces pathologies sont en relation avec le temps, la qualité de l'air intérieur et extérieur, mais aussi avec l'environnement social qui englobe les conditions de vie et de la profession.

XIII. 2. LES FACTEURS DE RISQUE ENVIRONNEMENTAUX

XIII. 2. 1. Hiérarchie des sensibilisations aux polluants chimiques et biologiques

Dans notre questionnaire, les polluants chimiques sont représentés par la pollution industrielle et automobile, la climatisation, les cosmétiques et les détergents. Quant aux polluants biologiques sont : l'humidité, les acariens, la poussière et les pollens. Pour les pollens, nous avons évoqué les espèces végétales allergisantes dans le Grand-Tunis qui sont : les graminées, les herbacées, les céréales, les oliviers et les cyprès.

Après l'analyse des données, nous enregistrons 127 tests positifs, soit 85 % du nombre total des patients contre 23 tests négatifs (15 %). Parmi l'ensemble des patients ayant des tests positifs, nous distinguons 12 % de sensibilisations aux polluants chimiques seulement, 15 % aux polluants biologiques seulement, 72 % aux polluants chimiques et biologiques ensemble et 12 % de patients ne présentent aucune allergie (Fig. 178).

³ IgE : Immunoglobuline E, correspondent à une classe d'anticorps uniquement retrouvée chez les mammifères (Larousse Médical, 2006).

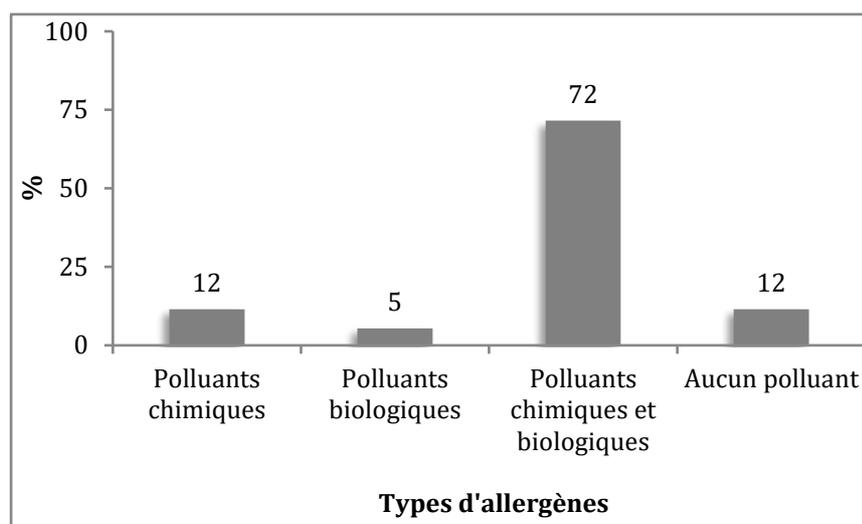


Figure 178 : Pourcentage des patients selon le type de polluant (*enquête spéciale*).

XIII. 2. 1. 1. La sensibilité aux polluants chimiques

Presque tous les patients présentent une allergie à au moins un polluant chimique, à l'exception du patient atteint de l'hémoptysie et la pleurésie (Tab. 110). Les pathologies les plus sensibles aux polluants chimiques sont l'allergie, l'asthme et la BPCO. Tandis que l'hémoptysie, la pleurésie, le pneumothorax, la pneumopathie, la douleur thoracique et même la bronchite chronique, leur sensibilité aux polluants chimiques est très faible.

La pollution automobile constitue l'allergène le plus allergisant.

Tableau 110 : Nombre de patients allergiques aux polluants chimiques par type de pathologie respiratoire. (*Source : enquête spéciale*).

Pathologie \ Type d'allergène	Type d'allergène				
	Polluants industriels	Pollution automobile	Climatisation	Détergents	Cosmétiques
Asthme	6	35	8	20	20
Allergie	4	23	12	9	15
DDB	2	2	1	2	3
BPCO	15	18	8	11	16
Bronchite chronique	1	6	3	3	3
Pneumothorax	1	3	4	2	4
Pneumopathie	1	3	2	1	1
Douleur thoracique	1	1	1	1	1
Pleurésie	0	0	0	0	0
Silicose	0	1	0	0	1
Hémoptysie	0	0	0	0	0
Total	31	92	39	49	64
% du total des patients	24	71	30	38	49

Il en ressort aussi du tableau 110 que les détergents gênent les femmes plus que les hommes, avec respectivement 63 % et 27 %, parce que les femmes sont plus exposées à ce type de polluant, notamment avec les tâches domestiques.

XIII. 2. 1. 2. La sensibilité aux polluants biologiques

Pour les polluants biologiques, l'allergène le plus incriminé est la poussière avec 35 % des patients. Pour les pollens, ce sont les graminées qui sont les plus allergisantes avec 29 % du total des patients (Tab. 111). En effet, les graminées prospèrent presque partout, dans les près et pâturages, aux bords des chemins ou dans des clairières. Ils sont présents dans l'air pour une longue période puisque leur pollinisation commence en avril et se termine en septembre, leurs principales floraisons se situent entre mai et juillet (El Gharbi *et al.*, 1976).

Tableau 111 : Nombre de patients allergiques aux polluants biologiques par type de pathologie respiratoire. (Source : enquête spéciale).

Allergène Type de Pathologie	Acarien	Poussière	Graminées	Herbacées	Céréales	Oliviers	Cyprès
Asthme	20	30	25	6	5	3	3
Allergie	11	22	6	4	3	3	1
DDB	1	4	1	0	2	0	0
BPCO	7	18	2	1	1	1	1
Bronchite chronique	2	6	2	1	1	1	1
Pneumothorax	2	4	0	0	0	0	0
Pneumopathie	1	2	1	0	0	0	0
Douleur thoracique	1	1	0	0	0	0	0
Pleurésie	0	0	0	0	0	0	0
Silicose	0	0	0	0	0	0	0
Hémoptysie	0	1	1	0	0	0	0
Total	45	88	38	12	12	8	6
% du total des patients	35	68	29	9	9	6	5

L'humidité excessive à domicile et les moisissures sont des facteurs de risque très fréquents aussi, avec un taux de prévalence de 30 % des patients interrogés : 71 % sont des asthmatiques et 29 % sont des allergiques. En effet, le facteur de l'humidité excessive et de moisissure ressort comme un facteur important expliquant 88 % de taux de prévalence d'asthme, toujours selon notre enquête personnelle.

XIII. 2. 2. Les gênes climatiques

Le printemps est la saison la plus inconfortable pour les patients atteints par une pathologie respiratoire avec 35 % des cas, suivie par l'hiver (28 %), l'été (18 %) et en fin

l'automne avec seulement 12 % des cas (Fig. 179). Tandis que le nombre de patients qui semblent ne pas être gênés par aucune saison sont au nombre de 19 soit 13 % du total des patients.

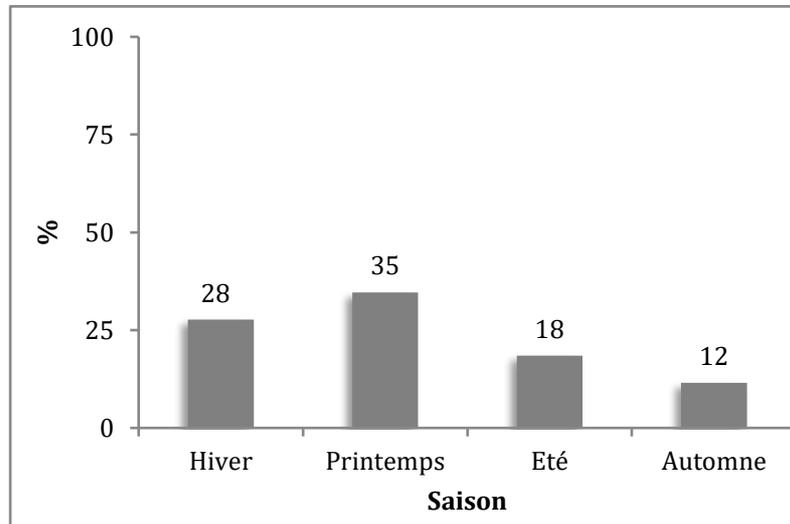


Figure 179 : Les saisons inconfortables selon les patients (*enquête spéciale*).

En effet, en hiver, le microclimat des habitats est souvent plus chaud qu'à l'extérieur à cause de la climatisation traditionnelle ou moderne. Cette différence de température peut irriter les gens sensibles. Aussi, en hiver les habitats sont peu aérés ce qui favorise le développement des acariens et des moisissures. Avec le printemps, la saison des pollens débute. À côté des moisissures et des acariens, les pollens constituent les facteurs de risque de la sensibilisation allergique les plus répandus.

Les résultats du questionnaire montrent une forte sensibilité des patients au froid avec 70 % du total des patients, 55 % sont sensibles au vent, 53 % à la chaleur et 50 % à l'humidité (Tab. 112). Selon les patients, la meilleure situation atmosphérique est un temps pluvieux. La pluie ne constitue un malaise que pour 28 % des patients, même si une dissémination de pollens particulièrement importante, qui peut être un risque d'allergie, succède souvent à une période de pluie (Helbling, 2010).

6 % des patients seulement, ne sont gênés par aucun paramètre climatique.

Tableau 112 : Nombre de patients allergiques aux polluants biologiques par type de pathologie respiratoire. (Source : enquête spéciale).

Conditions météorologiques Type de pathologie	Chaleur	Froid	Vent	Humidité	Pluie
	Asthme	21	38	29	25
Allergie	15	19	13	15	10
DDB	3	5	5	4	2
BPCO	20	19	16	14	8
Bronchite chronique	3	6	3	4	2
Pneumothorax	4	5	1	4	3
Pneumopathie	2	1	2	2	0
Douleur thoracique	1	0	1	0	0
Pleurésie	0	0	0	0	0
Silicose	1	1	1	1	1
Hémoptysie	0	1	0	0	0
Total	70	95	71	69	36
% du total des patients	54	73	55	53	28

XIII. 3. LES FACTEURS DE RISQUE INDIVIDUELS

Deux principaux facteurs de risque individuels peuvent initier ou aggraver une pathologie respiratoire : le tabagisme et l'atopie.

XIII. 3. 1. Tabagisme : les hommes sont les plus grands fumeurs et les femmes sont les plus exposées au tabagisme passif

Le tabac est un des facteurs de risque le plus invoqué dans la littérature pour l'appareil respiratoire avec le temps et la pollution atmosphérique.

Les tabagiques représentent 55 % des patients interrogés (72 cas), dont 93 % sont des hommes et 7 % des femmes. Les hommes tabagiques sont âgés entre 16 et 86 ans et les femmes tabagiques entre 28 et 63 ans.

Pour quantifier l'exposition totale au tabagisme chez les patients, nous utilisons l'unité du paquet-année (PA). Une formule que les médecins emploient pour mesurer le risque de survenue d'un cancer de poumon chez un patient. Pour calculer le PA, il suffit de multiplier le nombre de paquets de cigarettes fumées quotidiennement par le nombre d'années pendant lequel l'individu a consommé cette même quantité de paquets (en prenant pour référence un paquet de cigarettes américain, soit 20 cigarettes). Au-delà de 20 PA, il existe un risque de cancer (Wikipedia, 2015).

L'exposition au tabac, chez nos patients, varie entre 0.3 PA (patiente de 63 ans) à 138 PA (patient de 74 ans). Et, c'est les hommes qui détiennent le niveau d'exposition le plus élevé, tandis que les femmes fument très peu. En effet, 10 % des femmes seulement sont des fumeuses mais 32 % d'entre elles sont exposées au tabagisme passif. Dans ces conditions il est difficile d'accuser le tabac d'être responsable des pathologies de l'appareil respiratoire en Tunisie, par contre, l'exposition passive à la fumée du tabac montre qu'elle provoque une augmentation du risque.

XIII. 3. 2. L'atopie

Presque la moitié des patients ont un antécédent d'une pathologie pulmonaire dans la famille, que ce soit pour les asthmatiques admis aux urgences de Ben Arous (49 %) ou pour les patients interrogés dans l'enquête personnelle (52 %).

Concernant l'enquête spécialisée, les taux des patients ayant un antécédent dans la famille d'une maladie respiratoire est très élevé pour les asthmatiques et les allergiques avec 67 % du total de la maladie pour chaque pathologie, le taux est plutôt, moyen pour la BPCO avec 30 % du total de la maladie. Pour le reste des pathologies (DDB, bronchite chronique, pneumothorax, pneumopathie, douleur thoracique, pleurésie, silicose et hémoptysie) on ne peut pas juger le rôle de l'atopie sur le développement de la maladie car le nombre de patients est très faible (Tab. 113).

Tableau 113 : Taux des patients ayant un antécédent dans la famille d'une pathologie pulmonaire et nombre total des patients par type de pathologie respiratoire. (Source des données : enquête spéciale).

Type de pathologie	Nombre de patients	Taux (%) des patients ayant un antécédent dans la famille d'une maladie respiratoire
Asthme	43	67
Allergie	27	67
DDB	8	75
BPCO	30	30
Bronchite chronique	9	78
Pneumothorax	6	20
Pneumopathie	3	33
Douleur thoracique	1	0
Pleurésie	1	0
Silicose	1	0
Hémoptysie	1	0

Le déclenchement de la maladie, notamment pour l'asthme et l'allergie, est souvent plus précoce pour les individus ayant une prédisposition génétique de la maladie. L'évolution de la maladie à l'âge adulte ne semble cependant concerner qu'une minorité des malades.

(Fig. 180). Cependant, les individus, sans prédisposition génétique, la maladie semble se déclencher à un âge avancé (Fig. 181), probablement à cause d'autres facteurs, essentiellement le type de profession exercé par la personne.

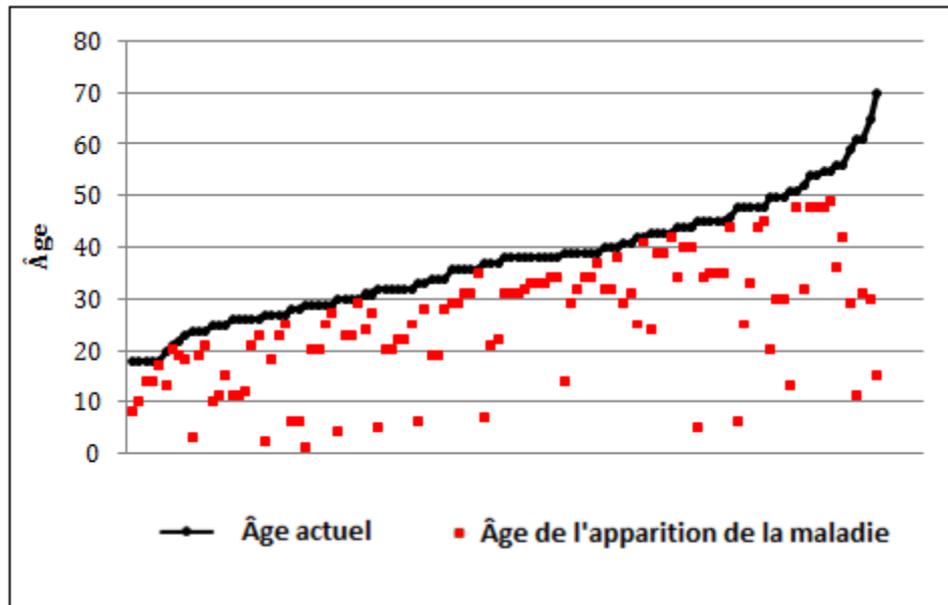


Figure 180 : Âge de l'apparition de la maladie par rapport à l'âge actuel des patients avec l'atopie. (Source des données : enquête spécialisée).

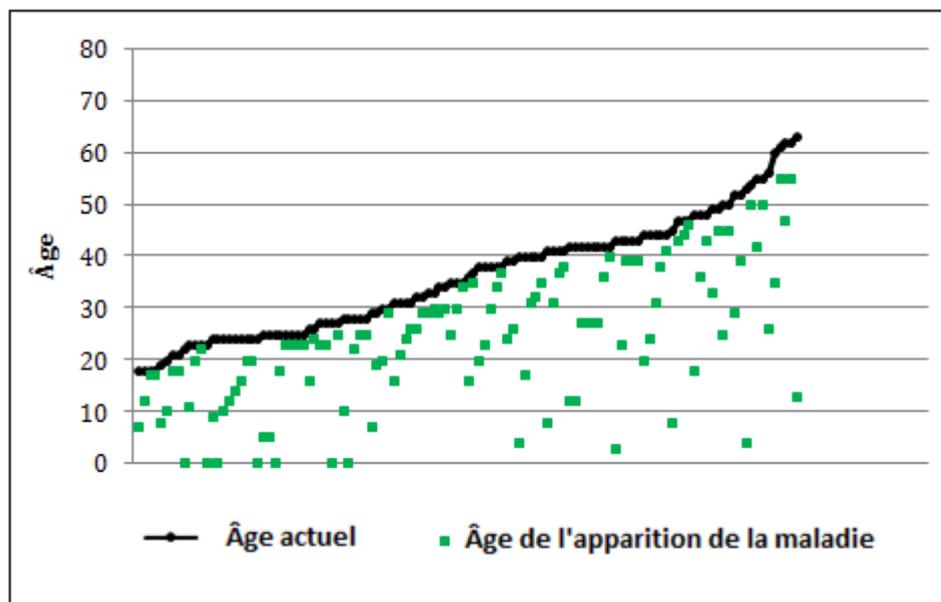


Figure 181 : Âge de l'apparition de la maladie par rapport à l'âge actuel du patient sans l'atopie. (Source des données : enquête spéciale).

XIII. 4. INFLUENCE DES NIVEAUX EDUCATIONNEL ET SOCIO-ECONOMIQUE SUR LA MALADIE RESPIRATOIRE

Nous allons évaluer les influences du statut socio-économique et le niveau éducationnel sur la maladie asthmatique à partir des données des asthmatiques admis aux urgences de Ben Arous.

Nous avons classé les patients dans deux catégories de statuts socio-économique, « Faible » et « Bon ». Nous jugeons un faible niveau socio-économique par le faible revenu (selon la profession) ou impossibilité du patient d'acheter son traitement. Concernant le niveau éducationnel, les différents niveaux sont classés comme suit : bas, pour le niveau primaire ; moyen, pour le niveau secondaire et élevé, pour le niveau supérieur.

XII. 4. 1. Niveau socio-économique suit le niveau éducationnel

57 % (132 patients) des asthmatiques admis aux urgences de Ben Arous ont un niveau socio-économique faible contre 43 % avec un bon niveau. Pour les études : 47 % (107 patients) ont un niveau primaire, 44 % (101 patients) ont un niveau secondaire et enfin 9 % (22 patients) seulement, ont un niveau supérieur.

Nous avons classé les patients selon le niveau socio-économique et le niveau éducationnel, les résultats sont très significatifs. La majorité des patients ayant un niveau socio-économique faible (74 % soit 97 patients) ont un niveau d'étude faible, 24% (32 patients) ont un niveau moyen et seulement 2 % (3 patients) ont un niveau élevé ou supérieur (Tab. 114). En effet, plus le niveau socio-économique est élevé, plus le niveau éducationnel est meilleur et *vice versa* !

Tableau 114 : Répartition des asthmatiques admis aux urgences de Ben Arous du 1^{er} juin au 31 décembre 2011 selon le niveau éducationnel et le niveau socio-économique.

(Source des données : UOCD Ben Arous).

Niveau socio-économique \ Niveau éducationnel	Bas	Moyen	Elevé	Total
Faible	97	32	3	132
Bon	10	69	19	98
Total	107	101	22	230

En effet, le calcul du coefficient de la corrélation linéaire montre qu'il existe une forte corrélation entre le niveau socio-économique et le niveau éducationnel du patient avec $r = 6,1$.

Le niveau éducationnel et les facteurs socio-économiques peuvent avoir un impact important sur la prise en charge et le recours aux soins associé à l'asthme ou aux maladies respiratoires en général. Aussi, appréhender ces facteurs permet de comprendre la perception que les sujets ont de la maladie ainsi que de l'exposition. À cela s'ajoutent des facteurs comportementaux tels qu'un recours plus fréquent au tabagisme ou un accès aux soins plus difficile, pour les patients de niveau socio-économique faible. Ces populations sont dès lors plus vulnérables. Les plus fragiles résistent moins bien quand intervient un pic de pollution ou un stress climatique.

XII. 4. 2. Inégalités socio-économiques entre les deux sexes

La répartition des hommes et des femmes selon le niveau socio-économique, montre que la majorité des femmes ayant consulté pour crises d'asthme ont un niveau socio-économique faible (70 %) contre 30 % seulement avec un bon niveau. Pour les hommes, c'est le contraire, le plus grand nombre (64 %) ont un bon niveau socio-économique contre 36 % de bas niveau (Fig. 182).

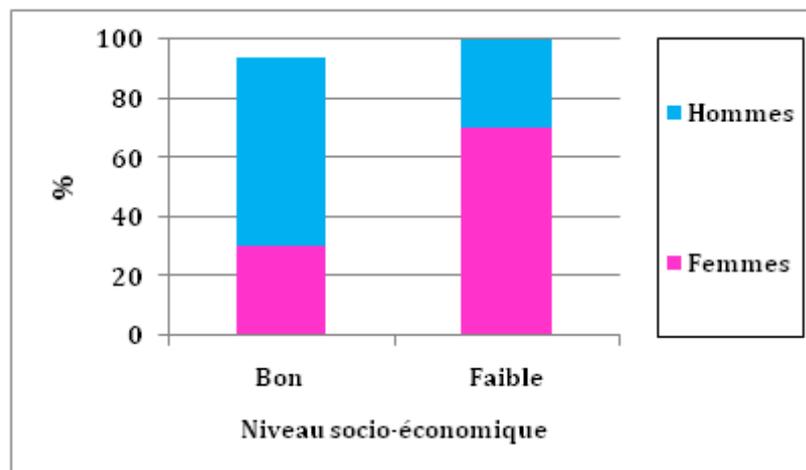


Figure 182 : Répartition des hommes et des femmes selon le niveau socio-économique. (Source des données : UOCD Ben Arous).

Ce résultat surprend et suggère que les femmes, en répondant au questionnaire, pourraient avoir tenu compte de l'apport financier de leur conjoint. Ainsi, la situation financière des femmes est assimilée à celle des hommes. La perception de la situation financière de la femme varie aussi, selon l'âge et diffère de celle de l'homme. Jusqu'à 25 ans, ces femmes asthmatiques s'estiment le plus à l'aise financièrement (50 % d'entre elles), mais avec l'avancement de l'âge elles souffrent plus financièrement (Fig. 183).

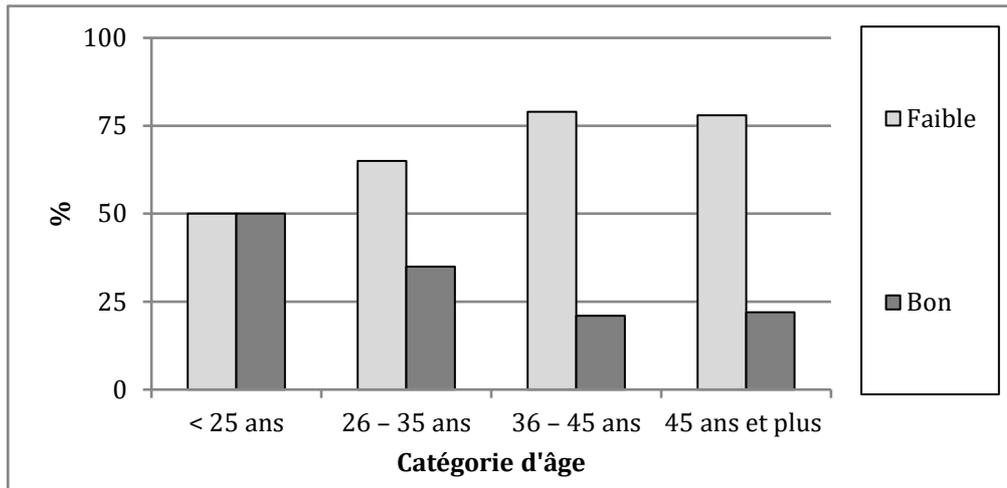


Figure 183 : Répartition des femmes asthmatiques selon le niveau socio-économique et la catégorie d'âge. (Source des données : UOCD Ben Arous).

Contrairement aux femmes, les hommes, dans toutes les catégories d'âges, sont plus aisés financièrement bien qu'entre 25-35 ans qu'ils peuvent avoir des difficultés d'argent (Fig. 184).

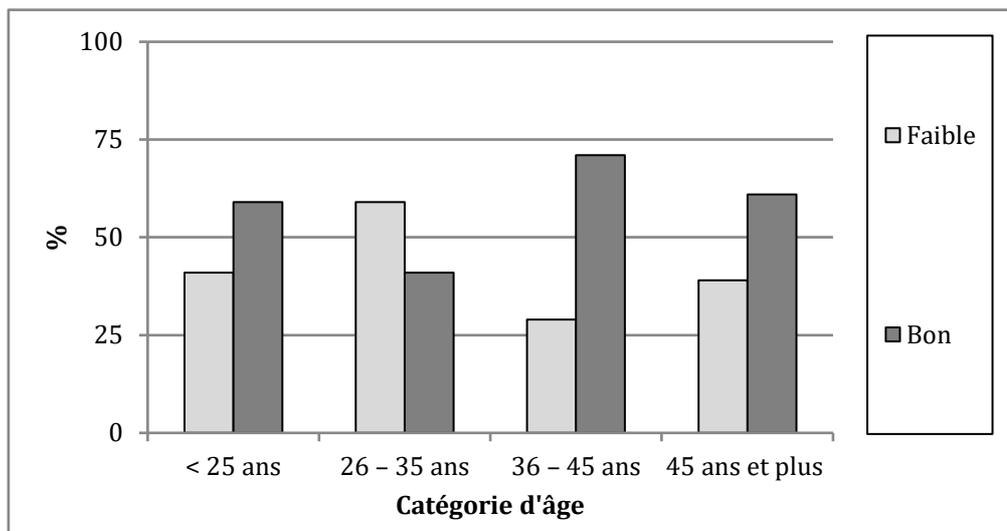


Figure 184 : Répartition des femmes asthmatiques selon le niveau socio-économique et la catégorie d'âge. (Source des données : UOCD Ben Arous).

De ce fait, la femme court un risque beaucoup plus élevé de tomber malade par l'asthme que l'homme. Elle est très dépendante de l'homme financièrement, surtout à un âge plus avancé, donc elle hésite, sûrement, à consulter et ne le fait qu'à un stade avancé de la maladie.

XIII. 5. SPECIFICITE DE L'ALLERGIE DANS LE GRAND-TUNIS

L'allergie respiratoire est une maladie chronique qui résulte d'un déséquilibre du système immunitaire causé à la fois par une prédisposition génétique et des facteurs

environnementaux (Devouassoux, 2003 ; Rancé, 2008). Les manifestations allergiques constituent un motif de consultation fréquent, notamment dans les consultations externes à l'hôpital La Rabta avec 13 % du total des consultations de la période 2005-2010 et 54 % des patients interviewés de l'enquête personnelle et aux urgences de Ben Arous entre le mois de juin et le mois de décembre 2011.

Il existe une allergie « perannuelle » et une allergie « saisonnière ». L'allergie perannuelle, est une allergie qui peut se déclencher à tout moment de l'année, comme les allergies aux acariens ou aux animaux. Même si les allergènes sont présents tout au long de l'année, certaines saisons peuvent favoriser des pics allergiques, par exemple l'automne pour les acariens. L'allergie saisonnière est celle dont les symptômes se déclenchent sur une période spécifique de l'année, liée à certains types d'allergène (Devouassoux, 2003). Les allergies respiratoires incluent la rhinite et l'asthme allergique. En effet, la rhinite allergique et l'asthme sont étroitement liés. Les parois de bronches et du nez sont tapissées avec le même type de cellules et réagissent de la même façon aux agressions des allergènes. Les études scientifiques montrent qu'il existe une relation forte entre la rhinite et l'asthme dans l'évolution de l'allergie. Plus de 40 % des patients qui souffrent de rhinite allergique ont de l'asthme et 80 % des patients asthmatiques souffrent de rhinite allergique (Château-Waquet, 2006 ; Rancé *et al.*, 2008).

XIII. 5. 1. L'allergie : une pathologie réponde et des consultations fréquentes dans le Grand-Tunis

L'asthme, l'allergie et la rhinite constituent des pathologies fréquentes de consultations dans le Grand-Tunis. Ils représentent ensemble 41 % du total des patients aux consultations externes à La Rabta entre 2005 et 2010, aux urgences La Rabta seul l'asthme est présent avec 7,8 % du total des hospitalisations en 2009.

La répartition des trois pathologies allergiques, selon le genre, montre une prédominance féminine avec 60 % du total des patients aux consultations La Rabta contre 40 % pour les hommes. Les femmes sont plus sensibles à l'asthme, à l'allergie et à la rhinite, elles représentent respectivement 30 %, 20 % et 10 % du total des consultations à La Rabta (Fig. 185). Aux urgences La Rabta, les femmes représentent 41 % d'admissions pour asthme contre 59 % pour les hommes.

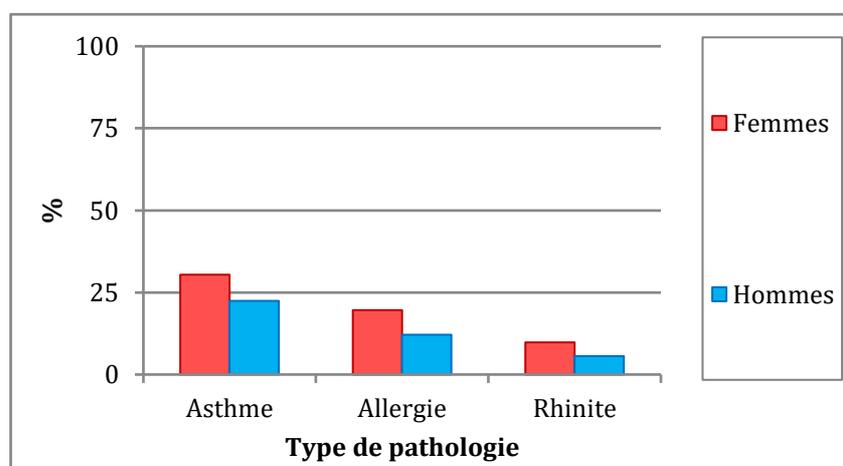


Figure 185 : Fréquence de l'asthme, l'allergie et la rhinite selon le genre. (Source des données : centre des consultations externes La Rabta entre 2005 et 2010).

XIII. 5. 2. Le calendrier pollinique du Grand-Tunis

Le développement de l'allergo-immunologie doit s'appuyer sur un inventaire fait, dans chaque pays, des allergènes responsables. Il est indispensable, en particulier, d'établir pour chaque région naturelle un calendrier qui indique au clinicien les dates moyennes d'apparition dans l'atmosphère, des grains de pollen des grandes familles végétales et aussi des spores de moisissures (El Gharbi *et al.*, 1976). En effet, le calendrier pollinique constitue un élément important dans le diagnostic et la prise en charge des pollinoses. En 1976, un calendrier pollinique a été réalisé pour la ville de Tunis par El Gharbi et collaborateurs. Ce calendrier évoque les onze familles ou genres des grains de pollen prédominant à Tunis. Elles représentent seules 89,95 % de la « pluie pollinique » annuelle. Les familles de plantes sont : Abiétacées, Cupressacées, Composées, Chénopodiacées, Graminées, Mercuriales, Myrtacées, Oléacées, Plantago et Urticacées. Le reste se répartissent en : Ombellifères, Crucifères, Renonculacées, Polygonacées (Rumes en particulier), Caryophyllacées, Ericacées, Dipsacées (*Scabiosa martima*), Gnétacées (*Ephedra altissima*), Labiées, Terebinthacées (*Pistacia lentiscus*, *Schinus molle*), Borraginacées (*Echium*), Caprifoliacées, Valérianacées, Légumineuses... Quelques unes se rencontrent plus particulièrement, ils ne peuvent pas figurer dans le calendrier pollinique vu leurs faibles quantités : *Ailanthus*, *Alnus*, *Buxus*, *Carpinus*, *Castanea*, *Celtis*, *Coryly*, *Carex*, *Fraxinus*, *Juncus*, *Platanus*, *Populus*, *Quercus*, *Ligustrum*, *Viburnum* (El Gharbi *et al.*, 1976).

Dans toute pollinisation, il y'a une période accessoire initiale, une période principale et une période accessoire finale. Mullenders *et al.*, (1972) ont défini ces périodes comme suit :

- **La période accessoire initiale** : est celle pendant laquelle le pollen est récolté pendant 3 jours consécutifs au moins, sans interruption ultérieure de plus de 5 jours et cela indépendamment du nombre de grains récolté ;

- **La période principale** : débute lorsque les moyennes courantes de 5 jours atteignent 1 % du nombre total de grains récoltés, pour l'espèce considérée, au cours de toute l'année et ce, pendant 3 jours consécutifs au moins. Elle se termine lorsque les moyennes courantes sont inférieures à 0,9 % pendant plus de 10 jours ;

- **La période accessoire finale** : s'étend de la fin de la période principale jusqu'au moment où le pollen est absent pendant 3 jours au moins, sans réapparition ultérieure de 3 jours consécutifs au moins (Mullenders *et al.*, 1972).

Selon le calendrier pollinique, à Tunis, la saison principale des Graminées débute fin avril pour se terminer fin mai. De même pour l'Oléacées, la saison principale dure de la mi-mai à la dernière semaine de mai. La période principale des Plantago se situe de la fin mars à la fin mai. Pour le pollen des Chénopodiacées, la période principale s'étend de la mi-mai à la fin mai. Les fleurs des Urticacées, pollinisent de janvier à juillet avec un pic en février-mars. Les Myrtacées fleurissent en septembre-octobre. Les Cupressacées, leur pollen est en février et en mars (Tab. 115).

Tableau 115 : Calendrier pollinique de la ville de Tunis. (Source : El Gharbi et al., 1976).

Genre des grains de pollen	Mois											
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Abiétacées												
Cupressacées												
Composées												
Chénopodiacées												
Graminées												
Mercuriales												
Myrtacées												
Oléacées												
Plantago												
Urticacées												

 Période accessoire
 Période principale

Le calendrier pollinique est d'un grand intérêt pour les allergiques. En plus du suivi de la maladie et la thérapie à laquelle doit se conformer, le patient peut lui-même veiller à sa santé et son hygiène de vie en se renseignant sur la dissimulation des pollens. Ce qui est impossible à Tunis et en Tunisie en général, puisque les calendriers polliniques datent de plusieurs décennies et les cartes polliniques sont inexistantes. Aucune institution ne mesure le pollen, dans un pays où l'allergie est de plus en plus répandue.

XIII. 5. 3. Une variabilité temporelle des allergies qui suit la saison des pollens

Vu l'étroite liaison entre l'allergie, l'asthme et la rhinite, nous avons suivi la variabilité mensuelle des consultations de ces pathologies au service des consultations externes de La Rabta. La variabilité des trois pathologies ensemble, suit la pollinisation des plantes au printemps et en automne, elle enregistre trois pics de consultations aux mois de mai et de novembre. Ces pics des allergies saisonnières suivent chronologiquement la saison des pollens (Fig. 186) :

- **Le pic du mois de mars** : si les patients ont été influencés par les pollens au mois de mars, ça sera probablement ceux des arbres (Abiétacées et Cupressacées) mais aussi des pollens des fleurs des Urticacées et des Mercuriales ;
- **Le pic du mois de mai** : les allergiques sont influencés essentiellement par le pollen des graminées, des Composées, des Chénopodiacées, des Oléacées et des Plantago ;
- **Le pic du mois de novembre** : ce pic, constitue la fin de la saison pollinique, qui s'achève avec les pollens essentiellement, des herbacées et des mauvaises herbes qui pollinisent tardivement.

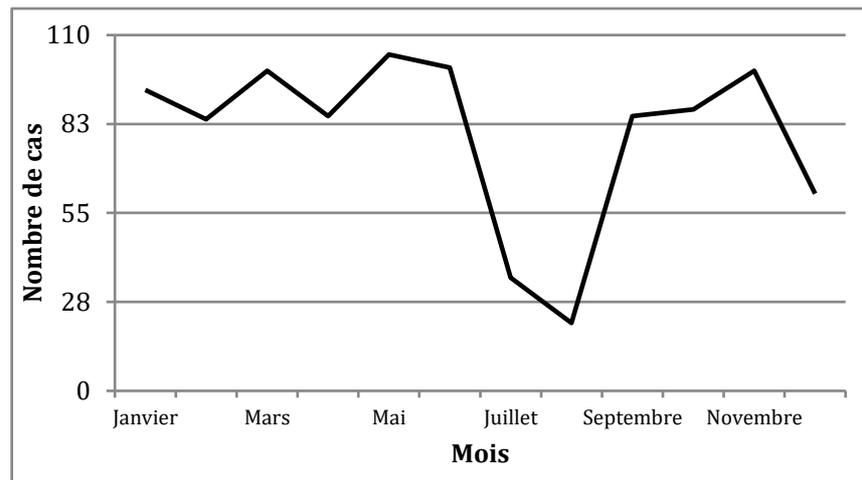


Figure 186 : Variabilité mensuelle du nombre de patients allergiques (asthme, allergie et rhinite) dans les consultations externes du service de pneumologie La Rabta (2005-2010).

Au mois de septembre, les pathologies allergiques refont leur grande apparition avec la recrudescence des allergènes (pollens, acariens, moisissures...).

La faiblesse des consultations en été, notamment pour les mois de juillet et août, peut être due aux congés des vacances de la majorité des médecins qui retardent les rendez-vous des patients pour septembre et octobre. Ce qui peut expliquer l'augmentation des consultations pendant ces deux mois.

En hiver, les plantes entrent en dormance et l'attention des allergiques, doit se porter sur les allergènes de l'habitat, des acariens et des moisissures profitant souvent du chauffage et de l'aération moindre pour proliférer.

XIII. 5. 4. Des métiers à risque d'allergies respiratoires professionnelles

Certains métiers représentent une activité à risque important d'allergies respiratoires professionnelles. Sur les 130 patients interrogés, dans notre enquête personnelle, 70 % des patients présentent une allergie (23 cas), rhinite allergique (4 cas) ou asthme allergique (43 cas). La répartition de leurs métiers était la suivante :

- **Professions intellectuelles** : nous comptons 10 patients exerçant une profession intellectuelle (professeur, cadre supérieur...), soient 6 hommes et 4 femmes. 50 % d'entre eux sont exposés au tabac passif et un seul patient est fumeur, atteint par une rhinite allergique. La maladie allergique est récente pour une femme de 47 ans, elle est devenue asthmatique depuis 3 ans, une autre de 24 ans, asthmatique depuis 1 an. Un homme est allergique depuis 4 ans. Une dame de 60 ans est allergique depuis 20 ans. 8 allergiques sur 10 ont des antécédents familiaux d'une pathologie pulmonaire.

- **Les agriculteurs** : le métier d'agriculteur comporte l'utilisation de nombreux produits potentiellement agressifs pour les voies respiratoires. Deux patients interrogés sont des agriculteurs, une femme de 52 ans et un homme de 63 ans. Ils sont atteints par la maladie à un âge avancé, respectivement à 42 ans et à 35 ans suite au contact direct avec les allergènes dans leurs métiers, notamment les moisissures et les pollens.

-Les chauffeurs : un seul chauffeur a été interrogé, il a 46 ans et une atteint récemment de l'asthme, depuis juste 3 ans. Sachant qu'il est non tabagique et sans antécédents familiaux d'une pathologie pulmonaire.

- **Le métier de la coiffure :** j'ai rencontré deux coiffeurs âgés de 16 et 28 ans. Le premier est devenu asthmatique depuis 3 mois, sans antécédents familiaux d'une pathologie pulmonaire, tandis que le deuxième est allergique depuis un an, il est fumeur (10PA) et antécédent d'un père atteint d'un cancer de poumon. Ils ont en commun une allergie aux cosmétiques.

-Commerçant dans les marchés : travailler dans les marchés est un métier à risque d'allergie car il se déroule en plein air en contact direct avec la pollution atmosphérique notamment la poussière. 4 patients exercent leurs métiers dans les marchés : une femme de 32 ans, commerçante de fripe, elle est allergique depuis 2 ans, sans antécédents familiaux d'une pathologie pulmonaire. L'autre patient est un commerçant de 50 ans, asthmatique depuis 9 ans, tabagique (2 PA) avec une sœur atteinte d'une maladie respiratoire.

-Couturière : 6 couturières dans un atelier âgées entre 28 et 63 ans, 3 asthmatiques et 3 allergiques. 5 d'entre elles ont un antécédent atteint par une maladie respiratoire. Deux patientes sont tabagiques (0,3 et 5 PA). L'âge d'atteinte de la maladie très avancée révèle que ce métier en est la cause directe.

- **Métier du bois et du bâtiment :** ce domaine concerne 3 patients, un ouvrier dans le bâtiment, un autre dans un atelier de publicité chargé par le collage et un menuisier. Tous sont asthmatiques et âgés respectivement de 56, 39 et 34 ans. L'ouvrier au bâtiment est atteint de l'asthme depuis deux ans, tabagique (36 PA), l'ouvrier dans la publicité est atteint depuis 13 ans (12 PA) et enfin le menuisier est asthmatique depuis 10 ans (non tabagique).

-Métiers de la santé : le travail en milieu de soins représente une activité à risque important d'allergies respiratoires professionnelles. Une infirmière de 52 ans interrogée est asthmatique depuis 10 ans avec une mère atteinte d'une maladie pulmonaire.

-Métier de plomberie : deux plombiers sont atteints par l'asthme et l'allergie. Un patient âgé de 40 ans (tabagique, 20 PA) et l'autre âgé de 16 ans. Le plus âgé est asthmatique depuis l'âge de 35 ans mais le plus jeune est allergique depuis l'enfance.

- **Autres professions :** nous avons rencontré des personnes exerçant plusieurs autres métiers comme : ouvrier dans une usine de l'huile, des serveurs dans un café, ouvriers dans des usines de fabrication des détergents, ouvriers dans des usines de fabrication des feuilles, électriciens, secrétaire dans un atelier de fabrication des matelas, les chômeurs, les élèves,...

Les femmes au foyer aussi, ne sont pas épargnées des pathologies allergiques et cela à cause de l'exposition chronique, répétée, à taux modérés ou élevés d'irritants contenus dans les produits de nettoyage.

En effet, la majorité des patients exercent des métiers à risque. De très nombreux produits employés dans le travail sont dégagés dans l'atmosphère du travail. Ce sont des irritants respiratoires qui peuvent jouer un rôle dans la survenue d'une allergie professionnelle.

L'atteinte des patients interrogés a été dans la majorité des cas après la pratique du métier. Les patients ignorent souvent, les conséquences de l'exposition à ces polluants sur leur santé et n'ont pas accès aux informations qui pourraient les aider à se protéger.

L'intensité et la durée de l'exposition jouent aussi un rôle dans la manifestation de la maladie, plus l'intensité néfaste du produit est forte et la durée est longue plus la menace est rapide. Comme ce fut le cas du jeune coiffeur de 16 ans, l'exposition excessive aux produits chimiques en une période courte a été la cause de son asthme, surtout qu'il n'est pas fumeur et n'a pas l'atopie. Toutefois, comme les travailleurs dans les métiers cités ne sont pas tous touchés, les facteurs individuels ont aussi de l'importance essentiellement le tabagisme et l'atopie. Les patients avec des antécédents atteints par une pathologie pulmonaire sont particulièrement plus vulnérables. En effet, les conditions du travail ajoutées à une génétique ont favorisé l'allergie de la patiente. Aussi, le rôle que peut jouer le tabac est indéterminé. Les fumeurs sont en général exposés aux troubles respiratoires plus que les non-fumeurs.

CONCLUSION

Ce chapitre met en évidence la variabilité des facteurs de risque impliqués dans les maladies respiratoires :

- La pollution automobile, comme polluant chimique et la poussière, comme polluant biologique, constitue les allergènes les plus en risque pour les maladies respiratoires notamment pour l'allergie, l'asthme et la BPCO ;
- Le tabac est consommé par 55 % des patients de l'enquête spécialisée avec une dominance pour les hommes. Bien que, les femmes fument peu, mais sont plus exposées au tabagisme passif. Donc il est difficile d'accuser le tabac d'être responsable des pathologies de l'appareil respiratoire en Tunisie, par contre, l'exposition passive à la fumée du tabac montre qu'elle provoque une augmentation du risque ;
- Par ailleurs, le faible niveau socioéconomique de la famille augmente la probabilité d'être exposé à plusieurs de ces facteurs de risque ;
- Le niveau socio-économique de la femme diffère significativement de son homologue masculin. Elle est plus démunie et court un risque plus élevé de tomber malade par une pathologie respiratoire ;
- Le printemps est la saison la plus inconfortable pour les patients atteints par une pathologie respiratoire, suivie par l'hiver, l'été et en fin l'automne ;
- L'allergie respiratoire inclut la rhinite et l'asthme allergique, c'est une maladie très fréquente dans le Grand-Tunis. Elle représente 41 % du total des consultations externes à La Rabta entre 2005 et 2010 et 7,8 % du total des hospitalisations aux urgences La Rabta en 2009 ;
- L'allergie est causée à la fois par une prédisposition génétique et des facteurs environnementaux. Les trois allergènes les plus accusés sont les acariens, les pollens et les moisissures ;

- Dans le Grand-Tunis, il existe trois grandes périodes risquées pour l'allergie : la première au mois de mars, la deuxième au mois de mai et enfin la troisième au mois de novembre. Chaque période est caractérisée par la forte présence d'un type d'allergène

essentiellement les pollens. Malheureusement il n'ya pas de carte pollinique dans le pays, qui permet d'identifier les pollens particuliers à chaque saison. Ce qui peut aider les patients de subdiviser une vie normale et saine ;

- Certaines professions constituent un risque d'asthme ou d'allergie professionnelle. Parmi ces métiers à risque, rencontrés dans notre enquête personnelle, les métiers de la santé, les chauffeurs, les commerçants dans le marché, les métiers du bois et du bâtiment ...

Quand on cumule les facteurs de risque, faiblesse des revenus et résidence dans un lieu peu aéré et très pollué, le risque d'être emporté par un pic de pollution ou un stress climatique est beaucoup plus élevé chez les individus à un faible niveau socio-économique que dans la population générale. À cela s'ajoutent des facteurs comportementaux tels qu'un recours plus fréquent au tabagisme ou un accès aux soins plus difficile.

Conclusion de la troisième partie

Le développement et l'aggravation des maladies respiratoires notamment de l'asthme et de l'allergie semblent découler d'une interaction complexe entre divers facteurs individuels et environnementaux, l'accroissement de sa prévalence dans le Grand-Tunis semble être associé à un phénomène multifactoriel. En effet, les facteurs de risque associés à la survenue ou à l'aggravation des pathologies respiratoires sont en relation avec le temps, la qualité de l'air et l'atopie. L'importance de ces facteurs varie selon la maladie considérée. Par ailleurs, le faible niveau socioéconomique de la famille augmente la probabilité d'être exposé à plusieurs de ces facteurs de risque. A cela s'ajoutent les facteurs comportementaux tels que le tabagisme, actif et passif et l'alcool.

Les principaux facteurs probablement ou possiblement associés à l'apparition ou l'aggravation des 5 maladies respiratoires représentant le plus grand nombre de patients (l'asthme, l'allergie, la BPCO, la bronchite chronique et la DDB) sont resumés dans le tableau 116.

Tableau 116 : Synthèse des principaux facteurs associés à l'exacerbation ou au développement des maladies respiratoires (pourcentage des patients ayant ce risque par rapport au total des patients de la pathologie). (Source des données : enquête personnelle).

Pathologie Groupe de facteurs	Asthme	Allergie	BPCO	Bronchite chronique	DDB
Atopie (histoire familiale)	63	63	27	11	13
Polluants chimiques	95	89	70	89	63
Polluants biologiques	16	93	60	67	63
Humidité excessive ou moisissure	63	41	27	56	50
Météo	95	100	90	67	75
TABAC	28	33	93	78	63
Exposition passive à la fumée du tabac	19	26	0	0	0
Niveau socio-économique	Haut : 15 Moyen : 33 Bas : 52	Haut : 2 Moyen : 35 BAS : 63	Haut : 7 Moyen : 7 BAS : 20	Haut : 11 Moyen : 22 BAS : 67	Haut : 13 Moyen : 13 BAS : 75

Conclusion générale

L'objectif principal de cette thèse était de caractériser l'impact des facteurs environnementaux, climat et polluants atmosphériques sur la santé respiratoire dans le Grand-Tunis. Pour ce faire, nous avons eu recours à une base de données riche et variée avec un grand nombre de facteurs de risque étudiés. L'analyse de ces facteurs pour les maladies respiratoires constitue une originalité de cette étude.

Les données utilisées sont :

- **Les données de la pollution de l'air** : des données horaires et journalières des polluants atmosphériques, issues de l'ANPE pour une période de 7 ans, allant de 2005 à 2011. Les huit stations de mesure de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis (Beb Saadoun, Beb Alioua, La Manouba, Ghazela, Ennahli, Parc Mourouj, Ben Arous et Radès) n'offrent pas de données dans toutes les stations sur la totalité de la période choisie et présentent toutes de nombreuses lacunes dans les séries de données que ce soit journalières ou horaires. Pour surmonter cette contrainte, nous avons choisi de focaliser l'analyse sur les polluants dont les séries de mesures sont les moins lacunaires et qui sont en même temps considérés, actuellement, comme des polluants qui affectent le plus la santé respiratoire : l'O₃ et les PM10. Par ailleurs, à cause de ces lacunes, nous n'avons pas pu modéliser et étudier la variabilité spatiale et temporelle de l'O₃ et des PM10 dans toutes les stations pendant toute la période d'étude ;

- **Les données cliniques** proviennent des principaux services publics de pneumologie dans le Grand-Tunis. Pour enrichir les données cliniques, nous avons interrogé 130 patients atteints d'une maladie respiratoire, dans le cadre d'une enquête sous forme de questionnaire, dans le but, entre autres, d'obtenir des informations portant sur le patient et sur la maladie. L'enquête a été d'un grand intérêt, elle m'a permis de m'approcher des patients et de mieux connaître la maladie respiratoire. Les patients en général non seulement acceptaient volontiers de répondre aux questions, mais semblaient même contents, pour beaucoup d'entre eux, d'être sollicités pour parler de leurs souffrances ;

- Pour **les données météorologiques**, elles ont été fournies par l'INM et téléchargées à partir des sites internet. La station météorologique de Tunis-Carthage est la seule station dans le Grand-Tunis dont les données sont disponibles sur internet. Ces données nous ont permis d'étudier la fréquence et la variabilité temporelle des extrêmes climatiques entre 2005 et 2011, pouvant constituer un risque pour la santé respiratoire.

Pour analyser le risque environnemental sur la santé respiratoire, notre démarche a été construite en 3 étapes, présentées au fur et à mesure dans les trois parties du travail : identification des risques, caractérisation des risques et estimation des risques.

- L'identification du risque : une des principales forces de cette étude porte sur le nombre de facteurs de risque étudiés dont un grand nombre revient à l'environnement (qualité de l'air extérieur, le temps qu'il fait). Parmi les principaux facteurs à risque, nous trouvons aussi ceux d'ordre socio-économique et individuel : l'atopie, le tabagisme,

passif ou actif, le niveau éducationnel faible, le niveau socio-économique bas et une profession exposée aux polluants.

- L'évaluation de l'exposition dose/réponse entre les paramètres météorologiques et les admissions hospitalières pour causes respiratoires d'une part, d'autre part, la relation entre les niveaux des polluants d'O₃ et de PM10 avec les admissions hospitalières : compte tenu de l'effet de certains paramètres météorologiques sur la concentration et la dispersion des polluants dans l'atmosphère, nous avons étudié aussi la relation entre les paramètres météorologiques et ces polluants. Les pics de pollution atmosphérique sont les dépassements des normes tunisiennes relatives à chaque type de polluant. Nous avons mis en relation ces jours de pics avec les paramètres météorologiques dans le but de chercher l'impact des paramètres météorologiques et les types de temps sur les fortes concentrations de ces polluants. Nous avons également mis en relation le nombre des hospitalisations avec les paramètres météorologiques, les plus affectant sur la santé respiratoire (température, humidité relative de l'air et le vent), ainsi qu'avec les jours de pics de la pollution de l'air.

- La caractérisation des risques : c'est la quantification du risque du temps et de la qualité de l'air sur les admissions hospitalières dans le Grand-Tunis. Nous avons choisi de quantifier, cette relation, à partir des indicateurs et des seuils prédictifs des variables météorologiques et de la qualité de l'air entraînant un surplus d'admissions hospitalières.

En effet, nous nous sommes focalisées sur les événements météorologiques extrêmes et les jours de pics de la pollution de l'air, car ils ont des répercussions dans la vie et la santé de l'homme notamment sa santé respiratoire. Dans la première partie de la thèse, nous avons consacré un chapitre aux « facteurs de risque météorologique », dans lequel nous avons étudié, sur une période de 7 ans (2005-2011), les épisodes météorologiques extrêmes. Les données météorologiques retenues sont : la température de l'air, le vent, l'humidité relative de l'air et l'insolation. Pour délimiter les jours paroxysmiques thermiques, nous avons utilisé les seuils définis pour la Tunisie (Ben Boubaker, 2010), et qui ont l'avantage d'associer simultanément la température de l'air ambiant minimale (T_{max}) et maximale (T_{min}). Les résultats montrent qu'en hiver, l'ambiance thermique dans le Grand-Tunis est plutôt fraîche ($15^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{min}} + T_{\text{max}} \leq 25^{\circ}\text{C}$), les jours de grand froid ($T_{\text{min}} + T_{\text{max}} \leq 4^{\circ}\text{C}$) sont totalement absents, quant aux jours froids ($10^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{min}} + T_{\text{max}} \leq 14^{\circ}\text{C}$), ils sont très rares. Durant toute la période d'étude (2005-2011), le Grand-Tunis n'a connu que 9 jours « froids » seulement et ceux durant l'année 2005. D'ailleurs, cette année-là a enregistré un nombre exceptionnel de patients dans le service des consultations externes à l'hôpital La Rabta avec 3051 patients, représentant un excédent de 130 % par rapport à la moyenne de la période, contre 2369 patients en 2009 et 2346 patients en 2008. Les jours frais sont enregistrés principalement durant la saison hivernale, ils peuvent être au printemps mais rarement en automne. Les années 2008 et 2009 seraient jugées les plus chaudes de la période. Les jours frais sont enregistrés principalement durant la saison hivernale, ils peuvent être au printemps mais rarement en automne. Quant aux jours chauds, ils sont déterminés avec une température absolue maximale (T_{max}) supérieure à 33°C et une température absolue minimale (T_{min}) supérieure ou égale à 20°C. Comme à l'échelle internationale, l'année 2009 dans le Grand-Tunis a été très chaude, avec le plus grand nombre de jours chauds (67 jours). Tandis que l'année 2005 détient le plus faible nombre de jours chauds sur la période d'étude (41 jours). La saison à risque pour les jours à grande chaleur s'étendant du mois de mai au mois d'octobre. Ce sont les mois estivaux (juin-août) qui présentent le

plus haut risque d'occurrence de paroxysme de chaleur dans le Grand-Tunis, ils détiennent les plus grands pourcentages de jours chauds.

La recrudescence des hospitalisations pour tous types de pathologies respiratoires a été plus élevée pendant les jours paroxysmiques froids et chauds, aux urgences La Rabta. Les pathologies les plus sensibles au froid ont été essentiellement l'asthme, la rhinite allergique et l'allergie.

Pour l'humidité relative extérieure, c'est la variation brusque qui constitue le facteur de risque pour les pathologies respiratoires notamment l'asthme. Une fluctuation tri-horaire de 20 % a pu déclencher des crises d'asthme, notamment dans le sens de la baisse. Quant au vent, c'est le paramètre météorologique qui a le plus d'influence sur la qualité de l'air, il agit sur la concentration et la dispersion des polluants. Sur la santé respiratoire, c'est la vitesse maximale qui peut causer un danger.

L'appréciation des interrelations climat/ santé respiratoire a été faite en utilisant des indicateurs bioclimatiques et des seuils absolus de stress météorologique, spécifiques au climat tunisois, pour prévoir des épisodes à risque pour la santé respiratoire. Pour le choix des seuils optimaux de stress météorologique, nous avons testé les différents indicateurs biométéorologiques (C1, C2), (C1', C2') et (C1'', C2''). Ces derniers sont analysés par type de saison : la saison froide (décembre, janvier, février et mars), la saison estivale (juin, juillet, août et septembre) et l'intersaison (octobre, novembre, avril et mai). Au final, nous avons défini les seuils biométéorologiques à partir des admissions aux urgences : au premier lieu, de toutes les pathologies respiratoires tous types confondus (chapitre XI), en second lieu, les seuils spécifiques à l'asthme (chapitre XII), une pathologie très sensible au climat. Les résultats obtenus confirment les estimations des excès de recrudescence des hospitalisations et des décès pour causes respiratoires liés aux extrêmes météorologiques et aux pics de pollution de l'air. Par ailleurs, ces résultats ont mis en évidence un effet cumulé sur quelques jours par rapport à celui d'une exposition du jour même, notamment pour les conditions météorologiques.

Les seuils biométéorologiques calculés pour toutes les pathologies respiratoires et ceux spécifiques à l'asthme sont très proches. Rien que les asthmatiques sont plus sensibles au vent pendant la saison intermédiaire. C'est que la vitesse maximale du vent ne doit pas dépasser 5 m/s, cependant, pour toutes les pathologies respiratoires confondues, le seuil est limité à 7 m/s.

En ce qui concerne la qualité de l'air, il est connu que la pollution atmosphérique entraîne des risques majeurs pour la santé des populations et la salubrité de l'environnement. Cependant, nous étions loin d'imaginer, avant d'entamer la présente recherche, que la pollution atmosphérique extérieure, dans le Grand-Tunis, pouvait être si destructive et l'air intérieur que nous respirons soit encore plus toxique. Toutefois, même si le risque de la pollution de l'air paraît évident, quantifier son impact sur la santé respiratoire l'est beaucoup moins. Dans le Grand-Tunis, les sources de pollution sont réparties sur tout le territoire. Leurs origines sont naturelles, domestiques ou industrielles et le trafic routier est particulièrement important. En contrepartie, le contrôle de la qualité de l'air est très limité avec un réseau de mesure peu dense et Inégalement réparti dans l'espace. Ce qui ne donne pas une idée totale et objective de la qualité de l'air sur tout le territoire de l'agglomération. 20 ans après l'installation de la première station, le Grand-Tunis n'en compte que 8 stations.

Dans le Grand-Tunis et en Tunisie en général, la pollution atmosphérique est souvent perçue comme un phénomène de dimension locale essentiellement d'origine industrielle et de trafic automobile et ses conséquences sanitaires sont jugées peu importantes sauf pour les populations résidentes dans le voisinage immédiat des installations industrielles et des grands réseaux routiers. Les résultats de notre étude ont révélé que des zones à vocation résidentielle comme La Manouba, où il n'y a pas d'industrie polluante et une circulation moindre qu'en centre-ville de Tunis, enregistre le plus grand nombre de pics de pollution photochimique dans toute l'agglomération tunisoise. Pour les PM₁₀, les niveaux les plus élevés sont enregistrés à proximité des sources d'émission des polluants notamment du trafic automobile, puis tendent à diminuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de celles-ci du fait de leur dilution dans l'air. Ce sont les sites de proximité routière (Beb Saadoun et Beb Alioua) qui sont les plus pollués puis le site à proximité de la zone industrielle de Ben Arous.

Durant toute l'année, les tunisois sont confrontés au moins à un risque environnemental : la pollution photochimique et les vagues de chaleur sont très répandues durant la saison chaude ; durant la saison froide, c'est le risque de froid et de la pollution particulaire ; et pendant les intersaisons, c'est la pollution biologique, avec les pollens, qui constitue le plus grand risque. Durant la semaine, l'effet de « jours ouvrables/week-end » influe sur les niveaux des PM₁₀ et d'O₃. Ils suivent le rythme d'émission des polluants de PM₁₀ et des polluants primaires, nécessaire à la formation d'O₃ : le trafic automobile et les rejets industriels. De ce fait, les tunisois sont plus exposés à la pollution aux PM₁₀ au cours de la semaine et à la pollution photochimique en fin de semaine. La vulnérabilité, à ces polluants, varie selon la localisation par rapport aux sources d'émission de ces polluants. Pour les PM₁₀, plus on s'approche des sources des émissions des polluants plus le risque est majeur. Tandis que pour l'O₃, plus on s'éloigne des sources des polluants primaires, nécessaires à sa formation, plus le risque est important. L'exposition à court terme à ces risques, l'aggravation des maladies respiratoires ou l'irritation du système respiratoire sont bien réelles.

L'évaluation des effets sanitaires de la pollution atmosphérique en milieu urbain comme celui du Grand-Tunis était un grand défi, à cause de la multiplicité des facteurs environnementaux, mais aussi à cause d'un cadre réglementaire trop tolérant par rapport aux normes internationales en vigueur. Nous sommes en 2016 et la réglementation de la qualité de l'air en Tunisie, se base encore sur la loi de 1994 non actualisée, alors que, le mélange atmosphérique urbain évolue au fil des années, quantitativement et qualitativement. Il en est de même des méthodes statistiques et d'estimation de l'exposition des populations. Pour cela, dans un premier temps, nous avons établi une comparaison entre le nombre de dépassements des seuils tunisiens et les recommandations de l'OMS relatifs à l'O₃ et aux PM₁₀. Puis, nous avons essayé d'appliquer des méthodes européennes récentes, qui ont prouvé leur efficacité dans l'évaluation de l'impact de la pollution sur la santé des habitants, avec les données cliniques tunisoises récentes. L'analyse des indicateurs environnementaux et sanitaires nous a permis de conclure qu'il y a une association significative entre concentrations d'O₃, de PM₁₀ et l'hospitalisation pour causes respiratoires observées dans les urgences La Rabta et Ben Arous. Durant les 7 années d'étude (2005-2011), le seuil tunisien relatif aux PM₁₀ fixé à 260 µg/m³ (valeur-limite, moyenne journalière) ou la valeur guide (120 µg/m³, moyenne journalière) et le seuil relatif à l'O₃ (valeur limite fixée à 235 µg/m³, moyenne sur une heure) ont été fréquemment dépassés dans toutes les stations qui présentent des mesures de ces polluants. Quant aux normes internationales fixées

par l'OMS ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM₁₀, moyenne journalière et de 150 à 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en moyenne pendant une heure pour l'O₃) n'ont été respectées que rarement.

Après la quantification du risque des admissions hospitalières, nous avons pu déduire des normes réalistes et mieux adaptées à la réalité tunisoise pour la qualité de l'air basée sur la concentration de l'O₃ et de PM₁₀.

Les secteurs de Beb Saadoun et de Beb Alioua sont les secteurs à très haut risque de pollution aux PM₁₀. Par régime de brise de mer, ils reçoivent d'importantes quantités de polluants du trafic automobile et des zones industrielles à l'Est et au SE des stations. Les situations atmosphériques à très haut risque pour la santé respiratoire sont essentiellement : les types de temps stables liés à des brises de mer ou de terre qui favorisent la production de l'O₃ et restreignent sa dispersion et sa dilution. Pour les PM₁₀, se sont essentiellement les situations estivales par temps chaud et sec avec des feux de végétation et les situations hivernales perturbées avec vent de sable ou anticycloniques qui sont propices à l'installation des brises littorales.

Tout le monde est concerné par la qualité de l'air, parce que tout le monde respire. Mais, les résultats ont révélé que certaines personnes sont plus sensibles à sa qualité médiocre et en souffrent plus que d'autres, même à une exposition de courte durée, lors des pics de pollution. Ces personnes sont essentiellement celles atteintes déjà par une maladie respiratoire et les sujets de 65 ans et plus. Il est à noter que les nourrissons et les jeunes enfants sont aussi très vulnérables à la pollution de l'air, mais nous n'avons pas retenu cette catégorie d'âge dans notre étude. Nous ne disposons pas d'informations sur ces jeunes sujets, car ils consultent des urgences et des hôpitaux spécifiques aux enfants. Par ailleurs, le faible niveau socioéconomique de la famille augmente la probabilité d'être exposé à plusieurs de ces facteurs de risque. À cela s'ajoutent les facteurs individuels (l'atopie, le tabagisme, actif et passif et l'alcool) qui peuvent différencier les comportements pathologiques face à une même agression climatique ou lors d'un pic de pollution de l'air. L'atopie joue un rôle très important dans l'apparition ou l'aggravation de la maladie notamment pour l'asthme et l'allergie. En effet, presque la moitié des patients ont un antécédent d'une pathologie pulmonaire dans la famille, 49 % pour les patients admis aux urgences de Ben Arous et 52 % pour ceux interrogés dans l'enquête spéciale.

Selon le genre, ce sont les femmes qui courent un risque plus élevé de tomber malade par l'asthme que les hommes. Une grande partie d'entre elles sont très dépendantes de l'homme financièrement, surtout à un âge plus avancé et elles ne consultent qu'à un stade avancé de la maladie.

Ainsi, bien que les résultats présentés soient prometteurs, des tests complémentaires devront être effectués, afin d'évaluer l'efficacité des seuils biométéorologiques et de la qualité de l'air à nos jours.

La présente étude constitue la phase initiale d'un projet à plus long terme ayant pour objectif le climat et la qualité de l'air en Tunisie en général.

Au final, nous espérons que les conclusions tirées dans ce travail de recherche seront utiles aux différents intervenants dans le domaine de la santé respiratoire en leur permettant de réagir avec efficacité aux défis associés aux facteurs de risque de ce type de maladies et surtout de les aider à instaurer les bases d'un système d'alerte précoce aux situations à risque pour la population atteinte, en rapport avec la variation du temps

et de la qualité de l'air. La prévention est en fait collective, impliquant de nombreuses disciplines scientifiques et l'intervention des pouvoirs publics. Elle est aussi individuelle, nécessitant des mesures personnelles de protection et un comportement responsable.

Nous espérons que ce travail puisse convaincre les intervenants dans ce domaine de l'intérêt de rendre disponible une information fiable et suffisante pour ce type d'études.

Nous espérons enfin que ce travail donnera le goût à d'autres chercheurs pour plus d'études sur l'effet de l'environnement (notamment le temps, le climat et la qualité de l'air) sur la santé, un domaine de recherche encore insuffisamment exploré en Tunisie.

Le contrôle de l'environnement et une meilleure hygiène de vie sont importants, une bonne connaissance de la maladie respiratoire et des traitements l'est tout autant.

Références bibliographiques

- Abaldi I, Tessier J-F, Kauffmann F, Jacqmin-Gadda H, Nejjari C et Salamon R** ; 1999 : Prevalence of asthma and mean levels of air pollution : results from the French PAARC survey. *European Respiratory Journal*, **14**, pp 132-138.
- Abdennadher M** ; 1994 : *Effets respiratoires de la pollution atmosphérique dans deux quartiers populaires de Tunis. Enquête en milieu scolaire*. Doctorat en médecine, Faculté de Médecine et de Pharmacie de Tunis, 76 p.
- ADEME** ; 2002 : *Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air*. Edition ADEME, 64 p.
- Afrite A, Allonier C, Com-Ruelle L et Le Guen N** ; 2008 : L'asthme en France en 2006 : prévalence et contrôle des symptômes. *Questions d'économie de la santé*, **138**, pp 1-8.
- Airparif** ; 2008 : *Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air et des travaux d'AIRPARIF sur ces polluants*. Pôle études, Octobre, Paris, 105 p.
- Airparif** ; 2011 : Origine des particules en Îles de France. Rapport d'activité. 172 p.
- Airparif** ; 2012 : Mesure de la qualité de l'air dans l'environnement immédiat de l'ancien dépôt de bus RATP de Lagny, rue des Pyrénées (Paris XX^e). Septembre 2012, 35 p.
- Airparif** ; 2014 : Qualité de l'air en Île de France en 2013. Rapport Airparif 2013.
- ALCOR-TEC** ; 2011 : *Elaboration de la « Stratégie Nationale sur le Changement Climatique » de la Tunisie*. Rapport de diagnostic, 148 p.
- Alibeu S** ; 2007 : Etude: les conséquences de la pollution automobile sur la santé des enfants. Article de presse, *Le Monde*.
- Alouane T** ; 2002 : *Les ambiances climatiques dans les principales régions touristiques de la Tunisie*. Thèse de doctorat (en Arabe), Université de Tunis, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 470 p.
- Alouane T, Ben Boubaker H et Hénia L** ; 2011 : Contraintes biothermiques dans un topoclimat de vallée en Tunisie tellienne. XXIV^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rovereto, pp 33-38.
- Annesi-Maesano I et Dab W** ; 2006 : Pollution atmosphérique et poumon ; Approches épidémiologique. *Médecine/Sciences*, **22**, pp 589-594.
- APPE (Alliance-Public Privé pour l'Environnement)** ; 2012 : *Guide environnemental dans diverses branches de l'industrie*. République Tunisienne, Coopération Tuniso-Allemande, 177 p.
- Artoisenet C et Delière D** ; 2006 : *La consommation de soins médicaux et les comportements de sous-consommation en Belgique et à l'étranger*. Rapport pour le SPF Santé Publique, Bruxelles, 48 p.
- Aubier M, Crestani B, Fournier M et Mal H** ; 2009 : *Traité de pneumologie*. Médecine Sciences Flammarion, 2007 p.

- AUGT (Agence Urbaine du Grand-Tunis)** ; 2010 : *Les équipements urbains dans les périmètres communaux du Grand-Tunis*. Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire, 50 p.
- Aumont B** ; 2005 : Modélisation de la chimie troposphérique. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches. Université Paris 12. Val de Marne UFR de Sciences et Technologie. 130 p.
- Baccarelli A, Giacomini S M, Corbetta C, Landi M T et Bonzini M** ; 2008 : Neonatal thyroid function in Seveso 25 years after maternal exposure to dioxin. *Plos Medicine*, **5**, 161 p.
- Baroudi M et Janssens J-P** ; 2013 : *Asthme*. HUG-DMCPRU-Service de médecine de premier recours, Genève, Suisse, 14 p.
- Batton-Hubert M, Roussel I, Rouchouse S** ; 1997 : Pollution atmosphérique urbaine et climat local : l'exemple de l'agglomération stéphanoise en 1997. *Revue de géographie de Lyon*, **72** (4) : 315-21.
- Bbak M** ; 2000 : Cold exposure and winter mortality in Europe. *The Lancet*, **350**, 591 p.
- Beaudeau P, Besancnot J-P, Caserio-Schönemann C, Cohen J-c, Dejou-Salamanca D, Empereur-Bissonnet P, Erniey Y, Ilf D, Laaidi K, Ledrans M, Le Tertre A, Médina S, Pascal M, Lecoffre C** ; 2004 : *Froid et santé. Éléments de synthèse bibliographique et perspectives*. Rapport d'investigation, institut de veille sanitaire, 44 p.
- Belguith-Megdiche I** ; 1999 : *Étude physico-chimique des aérosols atmosphériques en milieu urbain côtier : cas de la région de Sfax influence des conditions météorologiques locales et synoptiques*. Thèse, Université de Tunis II, Faculté des Sciences, Tunis, 206 p.
- Belhédi A** ; 2010 : *Statistique et Analyse des données*. Université de Tunis, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Tunis, 267 p.
- Bell M-L et Davis D-L** ; 2001: Reassessment of the lethal London fog of 1952: novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution. *Environ Health Perspect*, **109**, pp 389-394.
- Beltrando G et Chémery L** ; 1995 : Dictionnaire de Climat. Larousse, Paris, 363 p.
- Beltrando G** ; 2014 : Pollution de l'air aux particules en suspension dans l'air (PM) et santé des individus : un domaine de recherche pluridisciplinaire en développement pour les géographes. *BSGLg*, **62**, pp 93-100.
- Beltrando G, Dahech S et Madelin M** ; 2008 : L'intérêt de l'étude des brises thermiques : exemples des brises littorales et orographiques. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, **51**, pp 49-61.
- Ben Boubaker H** ; 2006 : Chaleur et canicules estivales dans les principales villes côtières de Tunisie. *XIX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Épernay, **19**, 107-112.
- Ben Boubaker H** ; 2010 : Les paroxysmes climato-thermiques en Tunisie : approche méthodologique et étude de cas. *Climatologie*, vol **7**, pp 57-87.
- Benmarhnia T, Mathlouthi F et Smargiassi A** ; 2013 : *Les impacts sanitaires des particules liées aux incendies de forêt*. Institut National de Santé Publique du Québec, Canada, 20 p.
- Ben Romdhane S, Beltrando G, Hénia L et Mougäida M** ; 2015 : Conditions climatiques et admissions pour crises d'asthme aux urgences de « Ben Arous »

(Tunisie).XXVIII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, pp 105-110.

Besancenot J-P ; 1990 : *Climat et tourisme*. Masson, Paris, 223 p.

Besancenot J-P ; 1995 : Pour une approche géographique des risques climato pathologiques. *Annales de Géographie*, **584**, pp 360-376.

Besancenot J-P ; 1997: Les grands paroxysmes climatiques et leurs répercussions sur la santé. *Presse thermale climatique*, vol 134, **4**, pp 237-246.

Besancenot J-P ; 1998 : *Incidences possible du réchauffement climatique sur la santé en France métropolitaine et dans les DOM-TOM au XXI^{ème} siècle, Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^{ème} siècle*. Paris : Premier Ministre, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, pp 111-121.

Besancenot J-P ; 2001 : *Climat et santé*. PUF, 128 p.

Besancenot J-P ; 2002 : Vagues de chaleurs et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement Risques et Santé*, 1 (4), pp. 229-240.

Besancenot J-P ; 2015 : Changement climatique et santé. *Environnement Risques Santé*, vol 14, **5**, pp 394-414.

Bettaieb J ; 2010 : *Impact de la chaleur de la pollution atmosphérique sur la mortalité dans la ville de Tunis (2005-2007)*. Mémoire de Master Recherche Epidémiologie, Université Bordeaux II, 46 p.

Blin C, Higuët I, Petit P et Brahy V (2007) : La pollution photochimique. In. *Rapport analytique sur l'état de l'environnement Wallon 2006-2007*, pp 332-341.

Bouhajja B, Souissi S, Balma A, Borsali N, Karoui N, Margheli S, Nourira S et Rezik N ; 2010 : Epidémiologie de la maladie asthmatique aux urgences. *4^{ème} congrès de la société française de médecine d'urgence*, pp 853-860.

Bouhlel N ; 2009: *Relation à court terme entre le climat, la pollution atmosphérique et les affections respiratoires*. Thèse de doctorat en médecine, Faculté de Médecine Sousse.

Brambilla C ; 2009 : *Dyspnée*.Référentiel sémiologie-Collège des Enseignants de Pneumologie, 7 p.

Brändli O et Braun-Fahrländer C ; 2002 : Asthme bronchique : l'importance de la famille et de l'environnement. *Forum Med Suisse*, N° **18**, pp 424-429.

Bustinza R , Tairou FO, Gosselin P et Bélanger D ; 2010 : *Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés au froid*. Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Québec, Canada, 104 p.

Camalier, L, Cox, W and Dolwick, P ; 2007 : The Effects of Meteorology on Ozone in Urban Areas and Their Use in Assessing Ozone Trends. *Atmospheric Environment*, 41 (33) : pp 7127-7137.

Cantat O ; 1991 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, **191**, pp 75-102.

CEC ; 1991: *Handbook for Urban Improvement*. Commission of the European Communities. Environmental Resources Ltd. London, 340 p.

Centemeri L ; 2009 : *Remembering the seveso disaster. The controversial construction of a "discreet memory"*. Senior researcher. CES/OSIRIS-University of Coimbra (Portugal), 21 p.

- Chabbi M et Abid H** ; 2008 : *La modalité urbaine dans le Grand-Tunis, évolutions et perspectives*. 90 p.
- Chabot F** ; 2007 : Insuffisance respiratoire aiguë du sujet âgé : commentaires. *Revue des Maladies Respiratoires*, vol 24, 4-C2, pp 41-48.
- Changnon S-A, Kunkel K-E et Reinke B-C** ; 1996 : Impacts and responses to the 1995 heat wave. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol 77, 7, july, 1497-1506.
- Charfi S** ; 2004 : *Contribution à la mise en évidence de l'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Tunis*. Faculté des Lettres de Tunis, 130 p.
- Charfi S** ; 2012 : La température dans l'agglomération de Tunis : comportement spatio-temporel. Thèse de doctorat en climatologie, Université de Tunis, 312 p.
- Charpin C et Palot A** ; 2009 : Pollution atmosphérique et santé : une relation à actualiser. Air pollution and health : A relationship to be updated. *La Revue de médecine interne*, 30, pp 3-4 ;
- Château-Waquet D**, 2006 : La rhinite allergique. *Décision thérapeutique en médecine générale*, 31, pp 8-13.
- Chauveau L** ; 2008 : *Le développement durable*. Petite Encyclopédie Larousse.
- Cherif J** ; 2005 : Conduite à tenir devant une hémoptysie. *Cours de pathologie respiratoire*, juin, 11, Tunis, 12 p.
- Cicolella A** ; 2008 : Les composés organiques volatils (COV) : définition, classification et propriétés. *Revue des Maladies Respiratoires*, vol 25, 2, pp 155-163.
- Clément M, Carfantan E, Gaulme M et Thevenet A** ; 2004 : *Evaluation et gestion des risques liés aux polluants atmosphériques*. Ecole nationale de la santé publique, Rennes, 44 p.
- Collard HR, Tino G et Noble PW** ; 2007 : Patient experiences with pulmonary fibrosis. *Respir Med*, 101, pp 1350-1354.
- Coudé-Gaussen G** ; 1992 : Les poussières éoliennes présentent-elles un risque pour la santé ? *Sécheresse*, 3, 260-265 pp.
- Dahech S** ; 2007 : Le vent à Sfax (Tunisie), impact sur le climat et la pollution atmosphérique. Thèse de doctorat de l'Université de Paris VII, 307 p.
- Dahech S et Beltrando G** ; 2007 : Les brises nocturnes à Sfax durant la saison estivale : répartition temporelle et impact sur la pollution de l'air. *XX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, pp 193-198.
- Dahech S, Beltrando G et Hénia L** ; 2007 : Le sirocco et son impact sur l'agriculture et la qualité de l'air dans la région de Sfax (Tunisie). *Sécheresse*, 18 (3), 177-184.
- Dahech S, Berges J C et Beltrando G** ; 2012 : Localisation et dynamique du front de la brise de mer au Maghreb oriental. *Climatologie*, vol 9, pp 57-81.
- Davis DL** ; 2000 : Air pollution risks to children : a global environmental health problem. *Environ Manager*, pp 31-37.
- Declercq C** ; 2010 : Effets à long terme de l'ozone sur la santé respiratoire. *Afsset. Bulletin de veille scientifique en sécurité sanitaire de l'environnement et du travail*, pp 37-41.

- De Cotret L-R** ; 2006 : Pollution de l'air : des effets sur la santé. *PASSEPORTSANTÉ.NET* (en ligne). Disponible sur : <<http://www.passeportsante.net/fr>> [consulté en avril 2013].
- Dematte JE, O'Mara K, Buescher J, Whitney CG, Forsythe S, Mc Namee T** ; 1998 : Near-fatal heat stroke during the 1995 heat wave in Chiago. *Ann Intern Med*, **129**, pp 173-181.
- Dematte JE, O'Mara K, Buescher J, Whitney CG, Forsythe S, McNamee T** ; 1998 : Near-fatal heat stroke during the 1995 heat wave in Chicago. *Ann Intern Med*, **129**, pp 173-181.
- Derbez M, Mosqueron L et Nedellec V** ; 2001 : *Quelles sont les expositions humaines à la pollution atmosphérique ?* Rapport de synthèse de PRIMEQUAL-PREDIT 1995-2000. Paris : La Documentation française, 62 p.
- Devouassoux G**, 2003 : Allergies respiratoires chez l'enfant et chez l'adulte. *Corpus Médical-Faculté de Médecine de Grenoble*, 19 p.
- DGAT (Direction Générale de l'Aménagement du Territoire) (A)** ; 2011 : *Atlas du Gouvernorat de Manouba*. Ministère du Transport et de l'Équipement, République Tunisienne, 109 p.
- DGAT (Direction Générale de l'Aménagement du Territoire) (B)** ; 2011 : *Atlas du Gouvernorat de L'Ariana*. Ministère du Transport et de l'Équipement, République Tunisienne, 88 p.
- DGAT (Direction Générale de l'Aménagement du Territoire) (C)** ; 2010 : *Atlas du Gouvernorat de Tunis*. Ministère du Transport et de l'Équipement, République Tunisienne, 73 p.
- Downs S-H, Schindler C, Liu L-J, Keidel D, Bayer-Oglesby L et Brutsche M-H**; 2007: Reduced exposure to PM10 and attenuated age-related decline. *Lung function. The New English Journal of Medicine*, **47**, pp 2338-2357.
- Du Pasquier D, Rochat T et Stalder H** ; 2004 : Crises d'asthme. *Primary Care* **4**, **18**, pp 366-369.
- Duché S** ; 2013 : *La pollution de l'air en région parisienne : exposition et perception sur les sites touristiques*. Thèse de doctorat, Université Paris Diderot-Paris VII, 227 p.
- Ducimetière P** ; 2011 : Associer pollution atmosphérique et risque pour la santé des personnes âgées. Quelles justifications ? Quelles conséquences ? *Extrapol*, **25**, juin, pp 3-4.
- Dutau G** ; 2008 : Rhinites allergiques : mieux informer les acteurs de santé de première ligne grâce à ARIA (Allergic rhinitis and its impact on asthma). *La lettre d'ORL et de chirurgie cervico-faciale*, **315**, pp 28-30.
- Eccles R** ; 2002 : An explanation for the seasonality of acute upper respiratory tract viral infections. *Acta Otolaryngol*, **122**, pp 183-191.
- El Gharbi, Charpin H, Aubert J, Renard M, Mallea M et Soler M** ; 1976 : Le calendrier pollinique de Tunis. *Revue Française Allergologie*, **16**, pp 25-31.
- El Melki T** ; 2007 : Inversions thermiques et concentration de polluants atmosphériques dans la basse troposphère de Tunis. *Climatologie*, vol 4, pp 105-129.
- El Melki T** ; 2008A : Conditions atmosphériques ambiantes et variation spatiotemporelle de la pollution atmosphérique dans le Grand-Tunis. *XII^{ème} colloque du département de*

géographie « Villes : Dynamiques, Climat et Environnement », Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités, Université de Manouba, pp 283-311.

El Melki T ; 2008B : Variation spatiotemporelle de la pollution photochimique dans le Grand-Tunis. *XXI^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Montpellier*, pp 243-248.

El Melki T ; 2009 : Les situations atmosphériques stables, un type particulier d'extrêmes climatiques : cas des surconcentrations d'ozone à Tunis. *Géographica Technica, Numéro spécial*, pp 151-156.

El Melki T ; 2010 : Brises du littoral et variation des concentrations polluées dans le Grand-Tunis : cas des banlieues de La Manouba et d'El Ghazela. *XXIII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes*, pp 2013-208.

Escourrou G ; 1999 : La spécialité du climat de l'agglomération parisienne. *Revue de géographie de Lyon*, 65 (2), pp 85-89.

Escourrou G ; 1991 : *Le climat et la ville*. Nathan, 192p.

Ferland M, Paquet G et Lapointe F ; 1995 : *Liens entre le statut socio-économique et la santé*. Publications Québec, Canada, 190 p.

Filleul L ; 2008 : Relation entre température, ozone et mortalité dans neuf villes française pendant la vague de chaleur de 2003. *Extrapole*, **36**, pp 25-27.

Fleuret S et Thouez J-P ; 2007 : Géographie de la santé. *Economica*, 301 p.

Foucault A et Raoult J.F ; 2001 : Dictionnaire de Géologie, *Dunod 5^{ème} édition*, 379 p, France.

Friedman MS, Powel K, Hutwagner L, Graham I et Teague G ; 2001: Impact of changes in transportation and commuting behaviors during the 1996 summer Olympic games in Atlanta on air quality and childhood asthma. *Journal of the American Medical Association*, **285**, pp 897-905.

Furon D, 2007 : Asthme et facteurs de risques professionnels. *Air pur*, **71**, pp 33-35.

Garric A ; 2015 : Plus de 4000 chinois meurent tous les jours de la pollution de l'air. *Le Monde.fr*, [en ligne] 14 août 2015. Disponible sur <http://ecologie.blog.lemonde.fr/2015/08/14/> [Consulté le : 16 août 2015].

GEREP-Environnement ; 2007 : Etude d'impact sur l'environnement de l'usine projetée d'acide phosphorique TIFERT dans le site de la Skhira. Tunisie, 239 p.

Giles B, Balafoutis C et Maheras P ; 1990 : Too hot for comfort : the heat waves in Greece 1987 and 1988. *International journal of biometeorology*, **34**, pp 98-104.

Giovanni M ; 1992 : *Les principes fondamentaux de la médecine chinoise*. Edition states, Belgique, 1320 p.

Gonzales B ; 2012 : *Influence d'un environnement chaud et humide sur les réponses perceptives et physiologiques : applications dans le domaine du sport et de la santé*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, 153 p.

Goudet A ; 2015 : Plus de 4 000 chinois meurent tous les jours de la pollution de l'air. *Le Monde*, en ligne, Disponible sur : <http://ecologie.blog.lemonde.fr/2015/08/14/> [Consulté le 17 août 2015].

Greuillet C et Galsomiès L ; 2013 : L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air. *Pollution atmosphérique*, juin, pp 163-172.

- Guay F et Baudouin Y** ; 2005 : Portrait des îlots de chaleur urbains à Montréal. *Franc Vert*, **2**.
- Hamzaoui A et Graïri H** ; 2003 : *Les dilatations des bronches*. Cours de pathologie. Juin, **3**, Tunis, 12 p.
- Heinlein R** ; 2011 : *Climat, météo et santé : Observatoire régional de la santé Nord-Pas de Calais*. 19 p.
- Hémon D et Jouglà E** ; 2003 : *Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques*. Rapport remis au Ministre de la santé, de la famille et des personnes handicapées le 25 septembre 2003. Inserm (Institut National de la Santé et de la recherche Médicale), 59 p.
- Hénia L** ; 1980 : Le sirocco et les types de circulation à sirocco en Tunisie. *Revue tunisienne de géographie*, **5**, pp 61-87.
- Hénia L** ; 1991 : Variabilité du climat et stratégies d'adaptation humaines en Tunisie. Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunisie, *série colloque 7^{ème}* (Volume VI), pp 165-178.
- Hénia L** ; 1998 : Les situations anticycloniques en Tunisie. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, **11**, pp 166-174.
- Hrouda P** ; 1984 : Fuite de gaz dans une fabrique de pesticides en Inde-Bhopal lundi 3 décembre 1984. Mission d'observation-Médecine sans frontières, société française et de médecine de catastrophe, *convergences médicales*, pp 1984-1994.
- INSERM** ; 2014 : *Inégalités sociales de santé en lien avec l'alimentation et l'activité physique*. Collection Expertise collective, Paris, 731 p.
- Institut canadien d'information sur la santé** ; 2001 : *Les maladies respiratoires au Canada*. Canada, septembre, 102 p.
- Jarraya M** ; 2009 : *Biométéorologie de la morbidité respiratoire dans le secteur public de la santé à Sfax*. Thèse de doctorat, Université de Paris VII, 331 p.
- Kadri F, Chaabane S, Tahon C** ; 2013 : Service d'urgences hospitalières : situations de tension et résilience. *Journées Doctorales et Journées Nationales du CDR MACS (JD-JN-MACS)*, Strasbourg, France, pp 1-8.
- Kalbousi H** ; 2008 : *Affections cardiovasculaires, climat et pollution atmosphérique. A propos d'une enquête épidémiologique réalisée dans la région de Sousse*. Thèse de doctorat en médecine, Faculté de Médecine Sousse, Tunisie.
- Keatinge WR** ; 2002 : Winter mortality and its causes. *Int J Circumpolar Health*, **61**, pp 292-299.
- Keim SM, Guisto JA and Sullivan JB Jr** ; 2002 : Environmental thermal stress. *Ann Agric Environ Med*, **9**, pp 1-15.
- Kenny WL** ; 2008 : Human cardiovascular responses to passive heat stress. *The Journal of physiology*, **586** (1), 3 p.
- Kinney P** ; 2008 : Ozone troposphérique et santé humaine : un renouveau de la recherche. *Extrapol*, **36**, pp 3-9.
- KKortli M** ; 2009 : *Effets du changement climatique sur la santé (humaine) en Tunisie : Vagues de chaleur et mortalité*. Projet de fin d'études pour obtenir le grade d'ingénieur

de l'INAT, Université de Carthage, Institut National Agronomique de Tunisie (INAT), 153 p.

Laaidi K, Economopoulou A, Wagner V, Pascal M, Empereur-Bissonnet P ; 2009 : *Vagues de froid et santé en France métropolitaine. Impact, prévention, opportunité d'un système d'alerte*. Institut de veille sanitaire, 50 p.

Lafay M-C et Perrin C ; 2007 : Asthme et allergies : environnement et traitement, où est on ? *Asthme et Allergie*, [en ligne], Disponible sur : (<https://asthme-allergies.org/pdf/medias/dp-etats-generaux-231107.pdf>) [Consulté en février 2014].

Lahmar L ; 2014 : *Climat et maladies respiratoires et cardiovasculaires à Sousse et Kairouan*. Thèse de doctorat en climatologie, Université de Tunis, 390 p.

Lajoie MD, Leclerc J-M et Chevalier P ; 2013 : *Asthme et allergies chez l'enfant : rôle des facteurs environnementaux aux programmes de prévention*. Institut national de santé publique, Québec, Canada, 97 p.

Laurent O et Bard D, 2007 : Niveau socio-économique, pollution atmosphérique et santé : quelles approches méthodologiques ? *Pollution atmosphérique*, **193**, pp 3-7.

Le Roux P ; 1992 : Climat, pollution et crise d'asthme en pédiatrie. *Risques pathologiques, rythmes et paroxysmes climatiques*, coordination de J.P Besancenot, pp 133-137.

Lefranc A et Mafaing Hélène (2008) : Les particules atmosphériques grossières (PM_{2.5-10}) affectent la variabilité du rythme cardiaque, les niveaux de lipides et d'éosinophiles dans le sang chez des adultes asthmatiques. *Extrapol*, **34**, *Pollution atmosphérique*, 197, pp 34-36.

Lehoucq R ; 2000 : Libre propos d'un physicien sur les sensations de chaud et de froid. *Climat et santé cahiers de bioclimatologie et de biométéorologie humaine*, pp 5-9.

Léophonte P ; 2001 : Les maladies respiratoires. *Presses Universitaire de France*, Paris, 127 p.

Lippmann M ; 2002: Les effets des polluants atmosphériques régionaux sur la santé. *Symposium sur la pollution atmosphérique et la santé publique*, Montréal, Canada, pp 20-21.

Lonati G, Guigliano M et Cernuschi S ; 2006 : The role of traffic emissions from weekend's and weekday's fine PM data in Milan. *Atmospheric Environment*, **40**, pp 5998-6011.

Lyons W-A et Olsson L ; 1973 : Detailed mesometeorological studies of air pollution dispersion over Chicago lake breeze. *Monthly Weather Review*, Boston, Vol 11, pp 387-403.

Marano F ; 2004 : *L'air*. ORS paca, 21 p

Martel B, Giroux J-X, Gosselin, Chebana F, Ouarda T et Charron C ; 2010 : *Indicateurs et seuils météorologiques pour les systèmes de veille-avertissement lors de vagues de chaleur au Québec*. Institut national de la santé publique du Québec, Institut national de la recherche scientifique -Eau, Terre et Environnement, Canada, 26 p.

Martin J et Maystre L-Y ; 1988 : *Santé et pollution de l'air*. Collection gérer l'environnement, 250 p.

- MEAT** (Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire) ; 1995 : *Etude de la qualité de l'air et de la pollution atmosphérique en Tunisie*. Société d'ingénierie de l'environnement et de l'énergie, Tunis, 180 p.
- Mehiri Ben Rhouma N, Kanoun J et Cherif J** ; 2008 : *La Sarcoidose*. Cours de pathologie respiratoire, 14, mars, 20 p.
- Mejri W** ; 2007 : *Climat et allergies respiratoires à Tunis*. Mémoire de master, Université des Arts et des Humanités de La Manouba, 168 p.
- Ministère de la santé, direction des études et de la planification** ; 2013 : *Carte sanitaire*. Tunis, 190 p.
- Ministère du Transport**; 2009 : *Les statistiques du secteur maritime et portuaire en Tunisie, 2007-2008*. Direction Générale de la Marine Marchande, 67 p.
- Mouvier G** ; 1994 : *La pollution atmosphérique*. Flammarion, Paris, 123 p.
- Mullenders W, Dirickx M, Van Der Haegen D, Bastin-Servais Y et Desair C** ; 1972 : La pluie pollinique à Louvain-Heverlee. *Louvain Médecine*, **91**, pp 159-176.
- Nemery B, Hoet P-H et Nemmar A** ; 2001 : The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *Lancet*, 357, pp 704-708.
- Nerhagen L, Bergström R, Forsberg B, Johansson C et Eneroth C** ; 2008: The mortality cost off matter due to emissions in the Stockholm area-an investigaton into harmfulness, sources and the geographical dimension on their impact. *VTI rapport* ,635 A, 36 p.
- OMM (Organisation météorologique mondiale)** ; 2010 : *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2009*. 1055, 13p.
- OMS (Organisation mondiale de la santé)** ; 1946 : *Actes de l'Organisation de la Santé*. **2**, 100 p.
- PAARC (Groupe coopératif)** ; 1086: Pollution atmosphérique et affections respiratoires chroniques ou à répétition. *Bulletin européen de physiopathologie respiratoire*, **18**, pp 87-116.
- Paluteau C** ; 2009 : *Chronique des événements météo en Charente et Charente maritime de 1970 à 31/12/2009*. 73 p.
- Pandley G et Bowonder B** ; 1993 : Decision making in a crisis : the case of the Bhopal disaster 1984. *Disaster management*, **5, 3**, pp 155-166.
- Paquet G** ; 1989 : *Santé et inégalités sociales. Un problème de distance culturelle*. Québec, Institut québécois de recherche sur la culture, 131 p.
- Pernelet-Joly V** ; 2008 : La composition chimique des particules atmosphériques : quels composants participent à la nocivité des particules ? *Extrapol*, **35**, pp198-199.
- Perriez F, Bartet J-H, Barthélemy F, Foin P, Battesti J-P, David J-P** ; 2003 : *Rapport sur la protection des incendies de forêt après les feux de l'été 2003*. 126 p.
- Planchon O, Dubreuil V, Domato F, Gouéry P et DecauxS** ; 2004 : Recherche sur les types de temps associés aux brises de mer. Une méthode d'analyse par télédétection. *Norois*, 191, pp 59-74.
- Prouvost H et Declercq C** ; 2007 : *Impact des particules en suspension sur la santé respiratoire des enfants*. ORS Nord-Pas-de-Calais, France, 37 p.

- Quénel P, Dab W, Festy B, Viau C et Zmirou** ; 2003 : Qualité de l'air ambiant. *Environnement et santé publique-Fondements et pratiques*, pp 291-315.
- Rancé F, Abbal M et Didier A** ; 2002 : Allergies et hypersensibilités chez l'enfant et chez l'adulte : aspects épidémiologiques, diagnostiques et principes de traitement. *Allergol Immunol Clin*, **42**, pp 378-401.
- Rimetz-Planclon J, Perdrix E, Sobanska S et Brémard C** ; 2008 : PM10 air quality variations in an industrialized harbor. *Atmospheric Environments*, **42**, pp 7274-7283.
- Rivolier J-C** ; 1972 : Météoropathologie humaine. Office français de recherche de bioclimatologie. *Les cahiers Sandoz*, **22**, 111 p.
- Rochat T, Bridevaux P-O, Gerbase M, Probst-Hensch N et Künzli N** ; 2012 : Quel est le rôle de la pollution atmosphérique dans l'asthme ? *Revue Médicale Suisse*, **8**, pp 2233-2236.
- Rosenberg N** ; 2012 : Allergies respiratoires professionnelles chez les personnels de santé. *Références en santé au travail*, **132**, pp77-92.
- Sabba S et Medjerab A** ; 2009 : La vague de froid de janvier dans le nord-est de l'Algérie. *Géographia Technica*. Numéro spécial, **20**, pp 413-418.
- Sandberg S, Jarvenpaa S, Penttinen A, Paton JY, and McCann DC** ; 2004 : Asthma exacerbations in children immediately following stressful life events: a Cox's hierarchical regression, *Thorax*, décembre, vol 59, **12**, 1046-51.
- Savis D-L** ; 2000 : Air pollution risks to children: a global environmental health problem. *Environmental Manager*, pp 7-31.
- Seigneur C, Tesche T, Roth P et Liu M** ; 1983 : On the treatment of point source emissions in urban air quality modeling. *Atoms, Env*, **17**, 1655-1676.
- Servais Y** ; 2015 : Silicose. docteurclic (un service santé assistance) [en ligne], Disponible sur : (<http://www.docteurclic.com/maladie/silicose.aspx>), [Date de consultation en septembre 2015].
- Shaban R, Zureik M, Soussan D, Neukirch C, Heinrich J, Wjst M, Cerveri I, Pin I, Bousquet J, Jarvis D, Burne P, Neukirch F et Leynaert B** ; 2008 : Rhinitis and onset asthma: a longitudinal population base study. *Lancet*, **72**, pp 1049-1057.
- Simpson J-E, Mansfield D-A et Milford J-R** ; 1977 : Inland Penetration of Sea-Breeze fronts. *Quart J Roy, Meteorol, Soc*, **103**, pp 47-76.
- Slama M** ; 1998 : *L'influence des paramètres climatiques sur la pollution de l'air à Tunis*. Mémoire de DEA, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 183 p.
- Taubes G** ; 1995 : Epidemiology faces its limits. *Science*, vol 269, **5221**, pp 164-169.
- Tshimanga P et Battisti O** ; 2015 : Comment je traite... un asthme bronchique inaugural ou déstabilisé de manière aiguë chez l'enfant. *Med Liège*, **70**, 2, pp 57-60.
- Tuddenham M** ; 2011 : Dates marquantes de l'histoire de la pollution atmosphérique. *Pollution atmosphérique*, **212**, octobre-décembre, pp 377-388.
- Valleron A-J** ; 2006 : L'épidémiologie humaine, condition de développement en France, et rôle des mathématiques. *Rapport de la science et la technologie*, **23**, 424 p.
- Wilkins R, Adams O et Branker A** ; 1990 : Évolution de la mortalité selon le revenu dans les régions urbains du Canada entre 1971 et 1986. *Rapport sur la santé, statistique Canada*, pp 137-174.

Willems S, Van de Geuchte I, Alaluf V, Impens J, Van Nespen I, Maulet N, Roland M et De Maesenee J ; 2007 : Problématique des inégalités socio-économiques de santé en Belgique. *Santé conjugulée*, 40 p.

Yoshikado H et Tsuchida M ; 1996: High levels of winter air pollution under the influence of the urban heat island along the shore of Tokyo Bay. *J. Applied Meteo*, **35** : pp 1804-1813.

Zeka A, Zanobetti A et Schwartz J ; 2005 : Short term effects of particulate matter on cause specific mortality effects of lags and modification by city characteristics. *Occupational and Environmental Medicine*, **62**, pp 718-725.

Zimmer A ; 2014 : *Première semaine de décembre 1930: un brouillard mortel dans la vallée de la Meuse*. Analyse de l'IHOES, **125**, 125 p.

Zouari K, Bouzid J, Bousnina A, Chayeb M, Karray N, Bradai N ; 1996 : *Implication des changements climatiques sur la zone côtière de Sfax (Tunisie)*. Athens : UNEP.

Bases de données en ligne

- **ATTT** (Agence Technique du Transport Terrestre) : www.attt.com.tn
- **Air PACA/Qualité de l'air** : www.airpaca.org
- **Airparif**: Association de surveillance de la qualité de l'air en France : www.airparif.asso.fr
- **ANME** (Agence Nationale pour la Maitrise de l'Energie) : www.anme.nat.tn
- **Association Santé Environnement France** : www.asef-asso.fr
- **Asthma and Allergy Foundation of America** : www.asthma-allergies.org
- **AXA prévention** : www.axaprevection.fr
- **BBC** : www.news.bbc.co.uk
- **CCHST** (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail) : www.cchst.com
- **CITEPA**: Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique : www.citepa.org
- **Duclair Environnement** : www.duclair-environnement.org
- **Google Earth**
- **INS** : Institut national de la statistique : www.ins.nat.tn
- **La Presse** : www.lapresse.tn
- **La Rousse** : www.larousse.fr
- **Larousse Médical** (édition 2006) : www.larousse.fr

- **Le Monde** : www.lemonde.fr
- **Le Point** : www.lepoint.fr
- **Medical diagnostics and medical plants** : www.lookfordiagnostics.com
- **Météo Beurdeau** : www.meteo-beurdeaux.com
- **METEO FRANCE** : www.Meteofrance.fr
- **Ministère de l'équipement, Tunisie** : www.mehat.gov.tn
- **Ministère de la santé, Tunisie** : santetunisie.rns.tn
- **Notre-planete.Info** : www.notre-planete.info
- **Observatoire de la qualité de l'air intérieur** : www.oqai.fr
- **OMM** (Organisation météorologique mondiale) : www.wmo.int
- **OMMP** (Office de la Marine Marchande et des Ports) : www.ommp.nat.tn
- **OMS** (Organisation Mondiale de la Santé) : www.who.int/fr
- **Prévention des risques majeurs** : www.risques.gouv.fr
- **QuelleAutomobile.fr** : www.quelleautomobile.fr
- **Réelles prévisions** : www.rp5.ru
- **RNSA** (Réseau National de Surveillance Aérologique) : www.pollens.fr
- **SPF Santé publique** : www.health.fgov.be
- **VAISALA** : www.vaisala.fr
- **WEATHER UNDERGROUND** : www.wunderground.com
- **Wetterzentrale** : www.wetterzentrale.de
- **Wikipedia** : www.wikipedia.org
- www.afghana.org
- www.blog-voyage.tn
- www.ina.fr
- www.lookfordiagnosis.com
- www.maxisciences.com
- www.nawat.org
- www.rebellyon.info

Table des figures

<u>Figure 1 : La neige dans le Sahara tunisien, autour de la ville de Nefta, février 2012. (Source : <i>blog-voyage.tn</i>, 2015).</u>	5
<u>Figure 2 : Londres, pendant l'épisode de « smog », décembre 1952. (Sources : <i>BBC, news.bbc.co.uk</i>).</u>	6
<u>Figure 3 : Incendie de l'usine chimique de Seveso (Italie), le 10 juillet 1976. (Source : <i>rebellyon.info</i>).</u>	7
<u>Figure 4 : L'usine d'Union Carbide à Bhopal (Inde). (Source : <i>lepoint.fr</i>, 2014).</u>	8
<u>Figure 5 : Les conséquences de la pollution sur le corps humain, spécifiquement sur l'appareil respiratoire (decreased lung function = diminution de la fonction pulmonaire). (Source : <i>US Environmental Protection Agency</i>, 2015).</u>	8
<u>Figure 6 : La pollution atmosphérique à Changchun en Chine, le 9 novembre 2015. (Source : <i>lemonde.fr</i>).</u>	9
<u>Figure 7 : La pollution atmosphérique à Mexico (Mexique). (Source : <i>Geography Blog</i>, 2015).</u>	10
<u>Figure 8 : Gabès, la nuit. (Source : <i>nawaat.org</i>, 2015).</u>	10
<u>Figure 9 : Schéma d'évaluation de l'exposition au risque sanitaire d'un polluant. (Beltrando, 2014).</u>	12
<u>Figure 10 : Localisation géographique du Grand-Tunis.</u>	20
<u>Figure 11 : Cadre géographique du Grand-Tunis. (Réalisation : Ben Romdhane. S, à partir du fond topographique 1/200 000 de Tunis).</u>	22
<u>Figure 12 : Structure de la population par gouvernorat et tranche d'âge en 2004. (Source : <i>INS</i>, 2004).</u>	24
<u>Figure 13 : Population selon le genre dans les gouvernorats du Grand-Tunis en 2011. (Source : <i>INS</i>, 2011).</u>	24
<u>Figure 14 : Distribution du nombre et pourcentage des lits dans les secteurs publics et privés et taux d'urbanisation des gouvernorats du Grand Tunis en 2011. (Réalisation : Ben Romdhane S., Source des données : Ministère de la santé publique, 2013).</u>	27
<u>Figure 15 : L'appareil respiratoire. (Source : <i>www.lookfordiagnosis.com</i>).</u>	29
<u>Figure 16 : Dyspnée, orientation étiologique en fonction de l'auscultation. (Source : <i>Chabot</i>, 2007).</u>	34
<u>Figure 17 : Niveau de déposition des particules inhalées dans l'appareil respiratoire selon leur taille. (Source : <i>Prouvost et Declercq</i>, 2007).</u>	38
<u>Figure 18 : Fréquence des jours froids ($10^{\circ}\text{C} \leq T_{\min}+T_{\max} \leq 14^{\circ}\text{C}$) et frais $15^{\circ}\text{C} \leq T_{\min}+T_{\max} \leq 25^{\circ}\text{C}$ de la période 2005-2011 à la station de Tunis-Carthage. (Source des données : <i>INM</i>).</u>	53
<u>Figure 19 : Fréquences saisonnières des jours froids de 2005 à 2011 à la station de Tunis-Carthage. (Source des données : <i>INM</i>).</u>	53
<u>Figure 20 : Fréquences mensuelles des jours froids entre 2005 et 2011 à la station de Tunis-Carthage. (Source des données : <i>INM</i>).</u>	54
<u>Figure 21 : Fréquences mensuelles du nombre de jours froids par année de la période 2005-2011 à la station de Tunis-Carthage. (Source des données : <i>INM</i>).</u>	54
<u>Figure 22 : Températures minimales absolues de la saison froide (octobre-mars) de la période 2005-2011 pour la station de Tunis-Carthage. (Sources de données : <i>INM</i>).</u>	56

Figure 23 : Températures minimales et maximales journalières avant, pendant et après la vague de froid du 25-30 janvier 2005 à la station de Tunis Carthage. (Source des données : INM).	57
Figure 24 : Situation en surface du 25 janvier 2005 à 00h (TU). (Source : wetterzentrale.de).	57
Figure 25 : Nombre de jours chauds ($T_{min} + T_{max} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 33^{\circ}\text{C}$) à la station de Tunis-Carthage entre 2005 et 2011 (Données : INM).	59
Figure 26 : Fréquences annuelles des jours chauds $T_{min} + T_{max} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 33^{\circ}\text{C}$ à la station de Tunis-Carthage de la période 2005-2011. (Source des données : INM).	60
Figure 27 : Nombre de jours chauds ($T_{min}+T_{max} > 53^{\circ}\text{C}$, avec $T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{max} > 33^{\circ}\text{C}$) par mois de la saison chaude pour la période 2005-2011 à la station. (Source des données : INM).	61
Figure 28 : Poids des vagues de chaleur (en °C) de la période 2005-2011 (données : INM). [Le cumul des degrés Celsius de la température absolue maximale au-delà de $33,0^{\circ}\text{C}$ et des températures absolues minimales au-delà de $20,0^{\circ}\text{C}$].	63
Figure 29 : Situation en surface et géo potentiel 500 hPa le 10 août 2009 à 00h. (Source : wetterzentrale.de).	64
Figure 30 : Répartition annuelle des tranches de vitesse du vent tri-horaire (en %) à la station de Tunis-Carthage entre 2005 et 2011. (Source des données : INM).	66
Figure31 : Fréquence mensuelle moyenne des vitesses tri-horaires du vent par tranche de vitesse tri-horaires calculées sur la période 2005-2011 (Sources des données : INM).	66
Figure 32 : Direction des vents tri-horaires par tranche de vitesses sur la période 2005-2011 à la station de Tunis-Carthage. (Sources des données : INM).	67
Figure 33 : Roses des vents mensuels moyens (de janvier à juin) à Tunis-Carthage pour la période 2005-2011 des données tri-horaires. (Source des données : INM).	69
Figure 34 : Roses des vents mensuelles (de juillet à décembre) à Tunis-Carthage de la période 2005-2011 des données tri-horaires. (Sources des données : INM).	70
Figure 35 : Répartition saisonnière des fréquences (A) et rose de vents (B), des vents forts (plus 8 m/s) des observations tri-horaires à la station de Tunis-Carthage de la période 2005-2011. (Source des données : INM).	71
Figure 36 : Fréquences mensuelles des vents forts (plus 8m/s) calculés à partir des données tri-horaires à la station de Tunis-Carthage de la période 2005-2011. (Source des données : INM).	71
Figure 37 : Moyennes mensuelles en heures de la durée d'insolation dans le Grand-Tunis de la période 2005-2008. (Source des données : INM).	72
Figure 38 : Fréquence de la nébulosité à partir des observations tri-horaire de la période 2005-2011. (Source des données : Weather Underground).	73
Figure 39 : Localisation des zones industrielles dans le Grand-Tunis. (Réalisation : Ben Romdhane. S, source des données : carte topographique 1/200 000 de Tunis et DGAT, 2010, A, B et C).	81
Figure 40 : Nombre de véhicules dans le Grand-Tunis par type d'énergie utilisé. (Source des données : ATTT, 2010).	82
Figure 41 : Répartition du parc automobile dans le Grand-Tunis selon l'âge en 2009. (Source des données : ATTT).	84
Figure 42 : Carte du réseau routier des voies ferrées dans le Grand-Tunis.). (Réalisation : Ben Romdhane. S ; adapté de la carte routière du Grand-Tunis, AUGT, 2010).	85
Figure 43 : Part du débit journalier moyen, en %, des véhicules dans les gouvernorats en 2007 en %. (Source de donnée MEHAT-DGPC, 2010).	86
Figure 44 : Réseau routier dans le gouvernorat de Tunis et nombre moyen journalier de véhicules en 2007. (Réalisée par : Ben Romdhane S. ; Source des données : AUGTT et MEAT).	87

Figure 45 : Nombre d'incendies dans les gouvernorats du Grand-Tunis entre 2005 et 2010 (source de données : INRGREF).	89
Figure 46 : Fréquence des feux de forêt dans le Grand-Tunis entre 2005 et 2010 (source des données : INRGREF).	90
Figure 47 : Photogénèse (A) et destruction (B) d'O₃.	91
Figure 48 : Système d'acquisition des polluants par l'ANPE. (Source : ANPE, 2005).	94
Figure 49 : Stations de mesure de la qualité de l'air : exemple des stations de trafic routier de Beb Alioua (à gauche) et de la station urbaine de la qualité de l'air d'El Ghazela (à droite). (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	94
Figure 50 : Têtes de prélèvement des polluants disposées sur une cabine (station urbaine d'El Ghazela (à gauche) et la station périurbaine de la qualité de l'air du Parc Mourouj (à droite). (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	95
Figure 51 : Analyseurs automatiques installés au sein d'une station de mesure (exemple de la station périurbaine du Parc Mourouj). (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	95
Figure 52 : Localisation des stations (ANPE) de la qualité de l'air et de la station météo de Tunis-Carthage. (Réalisée par Ben Romdhane S., à partir du fond topographique 1/200 000 de Tunis et la carte d'occupation du sol du Grand-Tunis en 2009 (AUGT)).	96
Figure 53 : Vue de la place de Beb Saadoun et site de la station de trafic de Beb Saadoun. (Image Google Earth, 2015).	97
Figure 54 : Environnement de la station trafic routier de Beb Saadoun. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	98
Figure 55 : Vue de la place « Ettasamoh » et site de la station de trafic de Beb Alioua. (Image Google Earth, 2015).	98
Figure 56 : Environnement de la station de trafic de Beb Alioua. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	99
Figure 57 : Vue sur le Technopôle d'El Ghazela et site de la station urbaine d'El Ghazela. (Image Google Earth, 2015).	99
Figure 58 : Environnement de la station de mesure de la qualité de l'air de Ghazela. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	100
Figure 59 : Site de la station urbaine La Manouba. (Image Google Earth, 2015).	100
Figure 60 : Environnement de la station urbaine La Manouba. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	101
Figure 61 : Site de la station urbaine Radès. (Image Google Earth, 2016).	101
Figure 62 : Station de surveillance de la qualité de l'air de Radès. (Photos : Ben Romdhane S., 2017).	102
Figure 63 : Vue sur le « Parc Mourouj » et site de la station de la qualité de l'air Parc Mourouj (image Google Earth, 2015).	102
Figure 64 : Environnement de la station périurbaine Parc Mourouj. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	103
Figure 65 : Vue sur le Parc Ennahli et site de la station de la qualité de l'air Ennahli (image Google Earth, 2015).	104
Figure 66 : Environnement de la station périurbaine Ennahli. (Photos : Ben Romdhane S., 2012).	104
Figure 67 : La station de proximité industrielle de Ben Arous. (Source : ANPE).	105
Figure 68 : Représentation schématique des sources des émissions des polluants primaires et secondaires. (Source : Air PACA, 2012).	108
Figure 69 : Phénomène normal de diffusion des polluants. (Source : www.appa-ds.com).	109

Figure 70 : Dispersion de la pollution atmosphérique lors d'un phénomène d'inversion de température. (Source : <i>www.appa-ds.com</i>).....	109
Figure 71 : Phénomène de convergence des vents entre la ville et la campagne. (Source : <i>IAU-IDF, 2010</i>)	110
Figure 72 : Schéma simplifié de la brise de mer (A) et de la brise de terre (B). (Source : <i>Beltrando et al., 2008</i>).....	111
Figure 73 : Moyennes journalières de l'O₃ (en µg/m³) dans les stations du Grand-Tunis en 2008. (Source des données : ANPE).....	113
Figure 74 : Concentrations horaires moyennes en O₃ (en µg/m³) dans les stations du Grand-Tunis en 2008. (Source des données : ANPE).....	114
Figure 75 : Taux journaliers moyens et la moyenne annuelle des PM10 (µg/m³) dans les stations du Grand-Tunis en 2008. (Source des données : ANPE).....	115
Figure 76 : Evolutions journalières des concentrations horaires de PM10 en 2008 en jours ouvrables et le week-end dans les stations du Grand-Tunis. (Source des données : ANPE).....	116
Figure 77 : Nombre de jours de dépassements de la valeur-limite relative à l'O₃ (235 µg/m³, moyenne d'une heure) de la période 2005-2011 dans les stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis. (Source des données : ANPE).....	121
Figure 78 : Nombre de dépassements de la valeur-limite relative à l'O₃ (235 µg/m³, moyenne pendant une heure) durant la journée dans les stations du Parc Mourouj, La Manouba et Ben Arous de la période 2005-2010. (Source des données : ANPE).....	122
Figure 79 : Nombre de dépassements de la valeur-limite d'O₃ (235 µg/m³, moyenne pendant une heure) durant la semaine dans les stations du Parc Mourouj et de La Manouba de la période 2005-2010. (Source des données : ANPE).....	123
Figure 80 : Poids des épisodes photochimiques (µg/m³) de la période 2005-2011. (Source des données : ANPE). [Le cumul horaire des surplus d'O₃ au-delà de la valeur limite (235 µg/m³)].....	125
Figure 81 : Rose des vents pour les tranches de vitesses : 0 à 1, 2 à 4, 5 à 7 et 8 à 11 m/s à la station de Tunis-Carthage au mois d'août 2008. (Source des données : INM).....	127
Figure 82 : Moyennes horaires de taux d'O₃ (µg/m³) et de NO₂ (µg/m₃) à la station de La Manouba (ANPE), le seuil d'O₃ (235 µg/m³) et la température moyenne horaire (°C) à la station de Tunis-Carthage du 28 au 31 août 2008 (<i>Weather Underground</i>).....	128
Figure 83 : Fréquence des directions du vent à la station de la qualité de l'air La Manouba du 28 au 31 août 2008 (Calme : 34 %). (Source des données : ANPE).....	129
Figure 84 : Roses de vent selon la vitesse à la station La Manouba (A) (ANPE) et à la station de Tunis Carthage (B) du 28 au 31 août 2008. (Source des données : INM).....	130
Figure 85 : Concentrations horaires de l'O₃, le seuil de l'O₃ (235 µg/m³), les vitesses horaires et les directions du vent à la station urbaine de La Manouba du 28 au 31 août 2008. (Source des données : ANPE).....	130
Figure 86 : Concentrations horaires moyennes dans 5 stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis du 28 au 31 août 2008. (Source des données : ANPE).....	131
Figure 87 : Organisation des champs barométriques du 29 (à gauche) et du 31 (à droite) août 2008 à 00 h. (Source : <i>wetterzentrale.de</i>).....	132
Figure 88 : Concentrations horaires d'O₃ (µg/m³), humidité relative et température de l'air ambiant (°C) à la station ANPE La Manouba, du 27 avril au 1^{er} mai 2008. (Source des données : ANPE).....	133
Figure 89 : Fréquences (%) de la direction du vent à la station urbaine de La Manouba du 27 avril au 1^{er} mai 2008 (Données : ANPE).....	133

Figure 90 : Concentrations horaires de l'O₃ à la station ANPE La Manouba, le seuil de l'O₃ (235 µg/m³), les vitesses horaires et les directions du vent à la station INM de Tunis-Carthage du 27 avril au 1 mai 2008. (Source des données : ANPE et Weather Underground).	134
Figure 91 : Organisation des champs barométriques du 27 (A), 29 (B), 30 (C) avril et du 01 mai (D) 2008 à 00 h. (Source : wetterzentrale.de).	135
Figure 92 : Taux horaires moyens de l'O₃, le seuil relatif à la santé de l'O₃ (en µg/m³) à la station périurbaine Parc Mourouj et la température de l'air ambiant (°C) à la station INM de Tunis-Carthage du 29 juillet au 02 août 2005. (Données : ANPE et Weather Underground).	136
Figure 93 : Roses de vent horaire selon la vitesse (m/s) des épisodes photochimiques du 29 -30 juillet (à gauche) et du 2 août 2005 (à droite) à la station INM de Tunis-Carthage. (Données : ANPE et Weather Underground).	136
Figure 94 : Taux horaires moyens d'O₃, le seuil relatif à la santé d'O₃ (en µg/m³) à la station périurbaine Parc Mourouj, la vitesse (m/s) et direction du vent à la station INM de Tunis-Carthage du 29 juillet au 02 août 2005. (Données: ANPE et Weather Underground).	137
Figure 95 : Organisation des champs barométriques du 29 juillet (à gauche), du 30 juillet (au milieu) et du 2 août à 00 h. (Source : Wetterzentrale).	137
Figure 96 : Concentrations horaires et seuil d'O₃ (µg/m³) à la station périurbaine du Parc Mourouj (ANPE) et la température de l'air ambiant (°C) à la station de Tunis-Carthage (Weather Underground), le 23 et 24 juillet 2007.	138
Figure 97 : Concentrations horaires d'O₃ (µg/m) à la station du Parc Mourouj (ANPE), la vitesse et la direction du vent à Tunis-Carthage (Weather Underground) le 23 et 24 juillet 2007.	139
Figure 98 : Fréquence (en %) de la direction du vent le 23 et le 24 juillet 2007. (Données : Weather Underground).	139
Figure 99 : Nombre de jours de dépassements des normes relatives aux PM₁₀ (Valeur guide, valeur limite et la recommandation de l'OMS) de la période 2005-2011 dans les stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis. (Source des données : ANPE).	142
Figure 100 : Nombre de jours de dépassements de la valeur-limite relative aux PM₁₀(260 µg/m³, moyenne journalière). (Source des données : ANPE).	143
Figure 101 : Poids des épisodes particuliers (µg/m³) de la période 2005-2011. (Source des données : ANPE). [Le cumul horaire des surplus des PM₁₀ au-delà de la valeur-limite (260 µg/m³, moyenne journalière)].	143
Figure 102 : Taux moyens horaires de PM₁₀ (µg/m³) à la station de Ben Arous le 28 et 29 août 2010. (Données : ANPE).	145
Figure 103 : Taux moyens horaires de PM₁₀ (µg/m³) à la station de Ben Arous (ANPE) et la température de l'air ambiant (°C) à la station de Tunis-Carthage le 28 et 29 août 2010. (Weather Underground).	146
Fig. 104 : Taux moyens horaires de PM₁₀ (µg/m³) à la station de Ben Arous (ANPE) et l'humidité relative de l'air à la station de Tunis-Carthage le 28 et 29 août 2010. (Weather Underground).	147
Figure 105 : Taux moyens horaires des PM₁₀(µg/m³) à la station de proximité industrielle de Ben Arous (ANPE) et la vitesse du vent (m/s) à la station de Tunis-Carthage le 28 et 29 août 2010. (Weather Underground).	147
Figure 106 : Organisation des champs barométriques des 28 (gauche) et 29 (droite) août 2010 à 00h00TU. (Source : wetterzentrale.de).	148
Figure 107 : Taux horaire des PM₁₀ (µg/m³) à la station de trafic routier de Ben Alioua le 10 janvier 2008. (Donnée : ANPE).	149

Figure 108 : Taux moyens horaires de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (ANPE) le 10 janvier 2008 à la station de trafic routier de Beb Alioua (ANPE) et moyennes horaires de la température ambiante de l'air à la station de Tunis-Carthage (<i>Weather Underground</i>).	149
Figure 109 : Organisation des champs barométriques du 10 janvier 2008 à 00h00TU. (<i>Source : wetterzentrale.de</i>).	150
Figure 110 : Taux horaire des PM10 à la station de Beb Alioua (ANPE), la vitesse et la direction du vent à la station de Tunis Carthage le 10 janvier 2008 (INM).	150
Figure 111 : Taux moyens horaires de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (ANPE) à la station de trafic routier de Beb Alioua, et des moyennes horaires de la température ambiante de l'air à la station de Tunis-Carthage le 14 janvier 2008 (<i>Weather Underground</i>).	151
Figure 112 : Taux moyens horaires de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) le 14 janvier 2008 à la station de trafic routier de Beb Alioua (ANPE), et des moyennes horaires de l'humidité relative de l'air à la station de Tunis-Carthage. (<i>Weather Underground</i>).	151
Figure 113 : Taux de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de trafic routier de Beb Alioua (ANPE), vitesse (m/s) et direction du vent à la station de Tunis-Carthage (INM) le 14 janvier 2008.	152
Figure 114 : Taux des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de trafic routier de Beb Saadoun (ANPE) et la température ambiante de l'air ($^{\circ}\text{C}$) à la station de Tunis-Carthage (INM) le 15 décembre 2006.	152
Figure 115 : Fréquence de la direction du vent le 15 décembre 2006 à la station de Tunis Carthage (<i>Weather Underground</i>).	153
Figure 116 : Organisation des champs barométriques du 15 décembre 2006 à 00 h (TU) à 500 hPa. (<i>Source : wetterzentrale.de</i>).	153
Figure 117 : Moyenne journalière de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de Beb Alioua (ANPE) et les moyennes journalières de la température à la station de Tunis-Carthage (<i>Weather Underground</i>) le 03 février 2009.	154
Figure 118 : Taux moyens horaires des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à la station de Beb Alioua (ANPE), la vitesse et la direction et du vent à la station de Tunis-Carthage (<i>Weather Underground</i>) du 02 au 04 février 2009.	155
Figure 119 : Organisation du champ barométrique de surface le 03 février 2009 à 00 h (TU) (<i>wetterzentrale.de</i>).	155
Figure 120 : Nombre total de patients enregistré au service de consultation externe La Rabta et nombre de jours froids par an entre 2005 et 2010. (<i>Source de données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta</i>).	165
Figure 121 : Cumul de consultations par saison à l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. (<i>Source de données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta</i>).	165
Figure 122 : Variabilité mensuelle du nombre total de consultations externes à l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. (<i>Source de données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta</i>).	166
Figure 123 : Répartition saisonnière des pathologies respiratoires dans le service des consultations externes à l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. (<i>Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta</i>).	168
Figure 124 : Nombre de jours selon le nombre de consultations aux consultations externes à l'hôpital La Rabta de la période 2005-2011. (<i>Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta</i>).	169
Figure 125 : Nombre de patients, dans les consultations externes à l'hôpital La Rabta et nombre de jours paroxysmiques froids et très froids ou chauds et très chauds entre 2005 et 2010. (<i>Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta et INM</i>).	170

Figure 126 : Maximum horaire journalier d'O₃ (µg/m³) à la station Parc Mourouj (ANPE) et le nombre de consultations à l'hôpital La Rabta (service de pneumologie de l'hôpital La Rabta) en 2005.	171
Figure 127 : Pourcentages des différents types de pathologies respiratoires aux urgences La Rabta en 2009.	174
Figure 128 : Part des décès (en %) par pathologies respiratoires dans les urgences La Rabta en 2009.	176
Figure 129 : Pourcentages des décès selon le groupe d'âge aux urgences La Rabta en 2009.	177
Figure 130 : Répartition quotidienne des admissions aux urgences La Rabta, la température moyenne (°C) et les jours paroxysmiques à la station de Tunis-Carthage en 2009 (INM).	178
Figure 131 : Fréquence des admissions pour pathologie respiratoire aux urgences La Rabta dans la semaine en 2009.	178
Figure 132 : Répartition mensuelle des décès aux urgences La Rabta en 2009 (source : Urgences La Rabta).	180
Figure 133 : Répartition saisonnière des décès par maladies respiratoires aux urgences La Rabta selon les groupes d'âges.	181
Figure 134 : Nombre d'hospitalisations aux urgences La Rabta et moyennes journalières des PM10 (µg/m³) dans la station de Beb Alioua (ANPE) du 1^{er} janvier au 28 février 2009.	210
Figure 135 : Nombre et taux d'évolution d'hospitalisations des pathologies avant le pic de pollution (du 1^{er} janvier au 2 février) et après le pic de pollution (du 3 au 28 février 2009). (Source des données : archives des urgences La Rabta et ANPE)	211
Figure 136 : Distribution par classes des niveaux d'exposition journaliers et des admissions hospitalières aux urgences La Rabta pour chaque niveau des moyennes de pollution aux PM10 pendant la saison froide dans les stations de l'ANPE (Beb Alioua, La Manouba, Ghazela et Ben Arous). (Source des données : archives des urgences La Rabta et ANPE).	215
Figure 137 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et des températures (minimale et maximale) (en °C) pendant l'épisode du 3-5 janvier 2009 (jours de pics et le jour précédent). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).	217
Figure 138 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et de l'humidité relative (minimale et maximale) (en %) pendant l'épisode du 3-5 janvier 2009 (jours de pics et jour précédent). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).	218
Figure 139 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et la vitesse maximale du vent (en m/s) pendant l'épisode du 3-5 janvier 2009 (jours de pics et les deux jours précédents). (Source des données : INM et urgences La Rabta).	219
Figure 140 : Roses de vent horaire selon le pourcentage de la vitesse (en m/s) du 3 (A) et du 5 janvier 2009 (B) à la station INM de Tunis-Carthage. (Source des données : Weather Underground).	220
Figure 141 : Taux de PM10 dans les stations de l'ANPE (Ben Arous, La Manouba, Beb Saadoun, Ghazela et Beb Alioua) (ANPE) et nombre d'admissions hospitalières aux urgences La Rabta (archives des urgences La Rabta) du 1^{er} janvier au 5 janvier 2009.	220
Figure 142 : Pression atmosphérique au sol (en hPa) à minuit (TU) le 3 et le 5 janvier 2009. (Source : Wetterzentrale).	221
Figure 143 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et de l'humidité relative (minimale et maximale) (en %) du 16 au 18 juin 2009 (jours de pics et les deux jours précédents). (Source des données : INM et urgences La Rabta).	222
Figure 144 : Pression atmosphérique au sol (en hPa) à minuit (TU) du 16 au 18 juin 2009. (Source : Wetterzentrale).	223

Figure 145 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences La Rabta et des températures (minimale et maximale) (en °C) le 13 et 14 mai 2009 (jours de pics et le jour précédent) (source des données : INM et urgences La Rabta).	224
Figure 146 : Pression atmosphérique au sol (en hPa) à minuit (TU) du 16 au 18 juin 2009. (Source : Wetterzentrale).	225
Figure 147 : Comparaison entre une bronche saine et une bronche durant une crise d'asthme. (Source : www.lookfordiagnosis.com).	228
Figure 148 : Pourcentage des facteurs responsables de déclenchement des crises d'asthme aux urgences de Ben Arous du 1^{er} juin au 31 décembre tel que déclarés par les patients (UOCD Ben Arous).	231
Figure 149 : Nombre de cas d'asthme aux urgences de Ben Arous selon l'heure de déclenchement de la crise (du 1^{er} juin au 31 décembre 2011) (UOCD Ben Arous).	232
Figure 150 : Évolution quotidienne des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous du 1^{er} au 31 décembre 2011 (UOCD Ben Arous).	232
Figure 151 : Nombre mensuel des admissions pour crise d'asthme aux urgences de Ben Arous du 1^{er} juin au 31 décembre (UOCD Ben Arous).	233
Figure 152 : Evolution mensuelle des crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) et des températures minimales et maximales à la station de Tunis-Carthage (Weather Underground) du 1^{er} juin au 31 décembre.	233
Figure 153 : Nombre quotidien d'admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) et les températures maximales et minimales à la station météorologique de Tunis-Carthage (INM) du mois d'octobre au mois de décembre 2011.	234
Figure 154 : Nombre d'admissions quotidiennes aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) selon la température minimale du même jour, à la station météorologique de Tunis Carthage (INM), pour la période octobre-décembre 2011.	235
Figure 155 : Nombre d'admissions quotidiennes aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) selon la température minimale sur 3 jours (j-2, j-1 et j) [°C], à la station météorologique de Tunis Carthage (INM), pour la période octobre-décembre 2011.	235
Figure 156 : Humidités maximales et minimales de l'air (en %) à la station de Tunis-Carthage (INM) et le nombre de crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) du 01 juin au 31 décembre 2011.	237
Figure 157 : Humidité relative (en %), température maximale (en °C) quotidiennes à la station de Tunis-Carthage (INM) e le nombre de crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) du 1^{er} juin au 31 septembre 2011.	237
Figure 158 : Concentrations maximales d'O₃ à la station du Parc Mourouj (ANPE) et nombre de crises d'asthme à l'urgence de Ben Arous (UOCD Ben Arous) du 1^{er} juin au 30 septembre 2011.	256
Figure 159 : Distribution par classes des niveaux journaliers d'exposition et des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous pour chaque niveau d'O₃ observé de la période juin-septembre 2011 à la station du parc Mourouj. (Source des données : UOCD Ben Arous et ANPE).	258
Figure 160 : Maximum journalier d'O₃ à la station du Parc Mourouj (ANPE) et nombre de crises d'asthme aux urgences de Ben Arous (UOCD Ben Arous) du 21 au 24 juin 2011.	260
Figure 161 : Moyenne horaire de l'humidité relative de l'air (en %) et de la température de l'air ambiant (en °C) à la station de Tunis-Carthage (INM) ; nombre de crises d'asthme (UOCD Ben Arous) du 21 au 24 juin 2011.	261

Figure 162 : Pourcentage de la direction du vent instantané par tranche de vitesses du 21 au 24 juin et du 23 et 24 juin à la station de Tunis-Carthage (<i>Weather Uunderground</i>).....	261
Figure 163 : Surface isobarique 500 hPa (en décimètre) et pression atmosphérique au sol (en hPa) le 23 (A) et le 24 juin 2011 (B) à 00h. (<i>Source : wetterzentrale.de</i>).....	262
Figure 164 : Taux d'O₃ (µg/m³) (<i>ANPE</i>), vitesse (en m/s) et direction du vent à la station de Tunis-Carthage (<i>Weather Underground</i>), du 21 au 24 juin 2011.	263
Figure 165 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences de Ben Arous (<i>UOCD Ben Arous</i>) et des températures (minimale et maximale) (en °C) (<i>Weather Underground</i>) le 15 et 16 décembre 2011.	264
Figure 166 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences de Ben Arous (<i>UOCD Ben Arous</i>) et de l'humidité relative de l'air (minimale et maximale) (en %) (<i>Weather Underground</i>) du 14 au 16 décembre 2011.	265
Figure 167 : La température horaire (en °C) (A), et l'humidité relative horaire (B) (en %) à la station de Tunis-Carthage (<i>Weather Underground</i>) et le nombre de crises d'asthme (<i>UOCD Ben Arous</i>) le 16 décembre 2011.	266
Figure 168 : Evolution des admissions hospitalières aux urgences de Ben Arous (<i>UOCD Ben Arous</i>) et la vitesse maximale du vent (en m/s) (<i>Weather Underground</i>) du 14 au 16 décembre 2011.	267
Figure 169 : Direction du vent instantané par tranche de vitesses du 15 (A) (9 % de situations calmes) et 16 (B) décembre 2011 à la station de Tunis-Carthage (<i>Weather Underground</i>).	267
Figure 170 : Le nombre de crises d'asthme (<i>UOCD Ben Arous</i>) et pression atmosphérique horaire (en hPa) à la station de Tunis-Carthage (<i>Wheather Underground</i>) le 16 décembre 2011.	268
Figure 171 : Carte de pression au sol du 16 décembre 2011. (<i>Source : wetterzentrale.de</i>).	268
Figure 172 : Evolution des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et des températures (minimale et maximale) (en °C) du 15 au 17 octobre 2011. (<i>Source des données : INM et UOCD Ben Arous</i>).....	269
Figure 173 : Evolution des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et de l'humidité relative de l'air ambiant (minimale et maximale) (en %) du 15 au 17 octobre 2011. (<i>Source des données : INM et UOCD Ben Arous</i>).....	270
Figure 174 : Evolution des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous et de la vitesse maximale du vent (en m/s) du 16 et 17 octobre 2011. (<i>Source des données : INM et UOCD Ben Arous</i>).....	271
Figure 175 : Direction du vent instantané par tranche de vitesses du 16 (A) (13 % de situations calmes) et 17 (B) octobre 2011 à la station de Tunis-Carthage (<i>Weather Underground.com</i>)....	272
Figure 176 : Surface isobarique 500 hPa (en décimètre) et pression atmosphérique au sol (en hPa) le 16 (à gauche) et le 17 (à droite) octobre 2011. (<i>Source : Wetterzentrale.de</i>).	272
Figure 177 : Nombre et heure de la crise d'asthme admis aux urgences de Ben Arous, le 17 octobre 2011 (<i>UOCD Ben Arous</i>).....	273
Figure 178 : Pourcentage des patients selon le type de polluant (<i>enquête spéciale</i>).....	277
Figure 179 : Les saisons inconfortables selon les patients (<i>enquête spéciale</i>).....	279
Figure 180 : Âge de l'apparition de la maladie par rapport à l'âge actuel des patients avec l'atopie. (<i>Source des données : enquête spéciale</i>).....	282
Figure 181 : Âge de l'apparition de la maladie par rapport à l'âge actuel du patient sans atopie. (<i>Source des données : enquête spéciale</i>).....	282
Figure 182 : Répartition des hommes et des femmes selon le niveau socio-économique. (<i>Source des données : UOCD Ben Arous</i>).....	284

<u>Figure 183 : Répartition des femmes asthmatiques selon le niveau socio-économique et la catégorie d'âge. (Source des données : UOCD Ben Arous).</u>	285
<u>Figure 184 : Répartition des femmes asthmatiques selon le niveau socio-économique et la catégorie d'âge. (Source des données : UOCD Ben Arous).</u>	285
<u>Figure 185 : Fréquence de l'asthme, l'allergie et la rhinite selon le genre. (Source des données : centre des consultations externes La Rabta entre 2005 et 2010).</u>	286
<u>Figure 186 : Variabilité mensuelle du nombre de patients allergiques (asthme, allergie et rhinite) dans les consultations externes du service de pneumologie La Rabta (2005-2010).</u>	289

Table des tableaux

Tableau 1 : Superficie, nombre d'habitants et taux d'urbanisation par gouvernorat en 2013. (Source : INS, 2013).	21
Tableau 2 : Les plantes allergisantes en Tunisie. (Source : El Gharbi et al., 1976).	23
Tableau 3 : Nombre d'établissements médicaux par gouvernorat. (Source : Ministère de la santé publique, 2013).	25
Tableau 4 : Nombre de cliniques (sans les centres privés d'imagerie médicale) par gouvernorat en 2014. (Source : INS, 2014).	25
Tableau 5 : Décalage entre pic de froid et impact sanitaire (morbidité ou mortalité). (Source : Laaidi et al., 2009).	36
Tableau 6 : Prédipositions familiales déterminant le risque de manifestation allergique chez l'enfant. (Source : Lajoie et al., 2013).	39
Tableau 7 : Lacunes dans les séries des mesures des polluants d'O₃, des PM₁₀, de NO₂ et de SO₂ issues des huit stations de mesure de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis entre 2005 et 2011. (Source des données : ANPE).	44
Tableau 8 : Nombre de malades enregistrés et nombre de dossiers triés par l'échantillonnage (15%) entre 2005 et 2010. (Source des données : enquête personnelle réalisée à l'hôpital La Rabta).	46
Tableau 9 : Typologie de froid. (Source : Ben Boubaker, 2010).	52
Tableau 10 : Durée des vagues de froid en nombre de jours sur de la période 2005- 2011 pour la station de Tunis-Carthage. (Source des données : INM).	55
Tableau 11 : Typologie de chaleur. (Source : Ben Boubaker, 2010).	58
Tableau 12 : Les durées des vagues de chaleur, en jour, de la période 2005-2011 dans le Grand-Tunis. (Source des données : INM).	62
Tableau 13 : Les 12 vagues de chaleur les plus importantes ayant un poids supérieur à 70°C de la période 2005-2011. (Source des données : INM).	63
Tableau 14 : Typologie du vent. (Source : Météo France).	65
Tableau 15 : variation de l'humidité relative trihaoraire de 20 % et plus de la période (juin-décembre 2011). (Sources des données : INM).	74
Tableau 16 : Un comparatif généraliste des principales caractéristiques des moteurs essence et gaz oil. (Source : Quelleautomobile.fr. Consulté en 2014).	83
Tableau 17 : Emissions des polluants par les moteurs des véhicules, en Tunisie et dans le Grand-Tunis, en 2006. (Source des données : ANME).	83
Tableau 18 : Pourcentage du trafic des navires du Grand Tunis par rapport au total national du 2002 au 2009. (Sources des données : Ministère du Transport-DGMM. 2009).	88
Tableau 19 : Nombre d'hectares parcourus dans les gouvernorats du Grand-Tunis entre 2005 et 2010 (source de données : INRGREF).	89
Tableau 20 : Les Concentrations horaires d'O₃ et les données météorologiques [température (°C), l'humidité relative de l'air (%) et la vitesse du vent (m/s)] des jours avec les taux extrêmes d'O₃ dans la station périurbaine du Parc Mourouj en 2005 et 2006. (Source de données : ANPE et INM).	117
Tableau 21 : Concentrations de PM₁₀ et données météorologiques moyennes [la température (°C), l'humidité relative de l'air (%) et la vitesse du vent (m/s)] des jours extrêmes dans les deux	

<u>stations de la qualité de l'air Ben Arous et Beb Alioua en 2008. (Source de données : ANPE et INM).</u>	118
<u>Tableau 22 : Dépassements de la valeur-limite, nombre de jours et d'heures de mesure d'O₃ dans les stations du Parc Mourouj, La Manouba et Ben Arous. (Source des données : ANPE).</u>	121
<u>Tableau 23 : Niveau de l'indice ATMO d'O₃ en France (en µg/m³). (Quénel et al., 2003).</u>	123
<u>Tableau 24 : Poids des épisodes photochimiques dans le Grand-Tunis de la période 2005-2011 [Le cumul horaire des surplus d'O₃ au-delà de la valeur limite (235 µg/m³)]. (Source des données ANPE).</u>	124
<u>Tableau 25 : Les jours de dépassements de la valeur limite relative à l'O₃ durant la saison chaude (mai-octobre) (ANPE), les températures minimales et maximales absolues à la station de Tunis-Carthage (INM) et le type de paroxysme thermique de la journée, de la période 2005-2011. ...</u>	126
<u>Tableau 26 : Dépassements des valeurs-guides (120 µg/m³, moyenne journalière) et des valeurs-limites (260 µg/m³, moyenne journalière) des PM₁₀, nombre de jours et d'heures de mesure des PM₁₀ dans les stations du Grand-Tunis entre 2005 et 2011. (Source des données : ANPE).</u>	141
<u>Tableau 27 : Jours et taux de dépassement de la valeur-limite relative aux PM₁₀ (260 µg/m³, moyenne journalière) dans les stations de Beb Saadoun, Beb Alioua et Ben Arous de la période 2005-2011. (Source de données : ANPE et INM).</u>	144
<u>Tableau 28 : Représentation des variables pour le calcul de la sensibilité et la spécificité. (Source : Martel et al., 2010)</u>	162
<u>Tableau 29 : Fréquences saisonnières des pathologies respiratoires dans le service des consultations externes à l'hôpital La Rabta entre 2005 et 2010. (Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).</u>	167
<u>Tableau 30 : Nombres de consultations quotidiennes aux consultations externes à l'hôpital La Rabta de la période 2005-2011. (Source des données : service de pneumologie de l'hôpital La Rabta).</u>	168
<u>Tableau 31 : Nombre de personnes ayant consulté pour une pathologie respiratoire aux urgences La Rabta selon le groupe d'âge, en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	174
<u>Tableau 32 : Répartition des pathologies selon le genre des patients hospitalisés aux urgences La Rabta en 2009. (Source des données: archives des urgences La Rabta).</u>	175
<u>Tableau 33 : Nombre et pourcentage des pathologies respiratoires selon la tranche d'âge aux urgences La Rabta en 2009. (Source des données : archive des urgences La Rabta).</u>	176
<u>Tableau 34 : Fréquence saisonnière de chaque pathologie respiratoire, par rapport au total des pathologies aux urgences La Rabta en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	179
<u>Tableau 35 : Nombre de jours selon les admissions aux urgences La Rabta en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	180
<u>Tableau 36 : Distribution mensuelle des jours de pic et le nombre d'hospitalisations à La Rabta en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	181
<u>Tableau 37 : Jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta pendant la saison froide en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	182
<u>Tableau 38 : Jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta pendant la saison chaude en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	183
<u>Tableau 39 : Jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta pendant la saison intermédiaire en 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	183

<u>Tableau 40 : Résultats des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison froide. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	184
<u>Tableau 41 : Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	185
<u>Tableau 42 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	186
<u>Tableau 43 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	187
<u>Tableau 44 : Résultats des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions hospitalières et les jour-1, aux services des urgences La Rabta pendant la saison froide. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	187
<u>Tableau 45 : Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1', C2'). (Source des données : INM et Urgences La Rabta).</u>	188
<u>Tableau 46 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1', C2'). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	189
<u>Tableau 47 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1', C2'). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	190
<u>Tableau 48 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières et les deux jours précédents, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison froide en 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	190
<u>Tableau 49 : Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	191
<u>Tableau 50 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	192
<u>Tableau 51 : Seuils optimaux du vent (m/s) avec l'indicateur (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	192
<u>Tableau 52 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	193
<u>Tableau 53 : Seuils optimaux avec l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	194
<u>Tableau 54 : Seuils optimaux avec la vitesse maximale du vent (m/s) avec les trois indicateurs (C1, C2), (C1', t2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	194
<u>Tableau 55 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences La Rabta et les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison froide 2009. (Source des données INM et archives des urgences La Rabta).</u>	195
<u>Tableau 56 : Résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	197
<u>Tableau 57 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme et les jours-1, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	198
<u>Tableau 58 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières et les deux jours précédents, aux services des urgences La Rabta</u>	

<u>enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude en 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	199
<u>Tableau 59 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	200
<u>Tableau 60 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	201
<u>Tableau 61 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	201
<u>Tableau 62 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences La Rabta et les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison chaude 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	202
<u>Tableau 63 : Résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta, enregistrées à Tunis-Carthage pendant la saison intermédiaire 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	203
<u>Tableau 64 : Résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières aux services des urgences La Rabta 2009, enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison intermédiaire. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	205
<u>Tableau 65 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions hospitalières et les deux jours précédant, aux services des urgences La Rabta enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant la saison chaude en 2009. (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	206
<u>Tableau 66 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	207
<u>Tableau 67 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	208
<u>Tableau 68 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).</u>	208
<u>Tableau 69 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences La Rabta, les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison intermédiaire en 2009. (Source des données INM et archives des urgences La Rabta).</u>	209
<u>Tableau 70 : Nombre de décès par pathologie respiratoire et par groupe d'âge aux urgences La Rabta du 1^{er} janvier au 28 février 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	212
<u>Tableau 71 : Nombre de patients hospitalisés aux urgences La Rabta (du 3 au 28 février 2009) selon le genre et la catégorie d'âge. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	213
<u>Tableau 72 : Décalage entre pic de pollution aux PM10 et impact sanitaire (hospitalisation ou décès « D ») du 3 au 27 février 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta).</u>	213
<u>Tableau 73 : Nombre d'hospitalisations aux urgences La Rabta et niveaux des moyennes journalières des PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans les stations de la qualité de l'air dans le Grand-Tunis (Beb Alioua, La Manouba, Ghazela, et Ben Arous) de la saison froide 2009. (Source des données : archives des urgences La Rabta et ANPE).</u>	214
<u>Tableau 74 : Niveau de l'indice de la qualité de l'air en PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour le Grand-Tunis.</u>	216
<u>Tableau 75 : Les fluctuations thermiques (°C) tri-horaires durant l'épisode 3-5 janvier 2009. (Source des données : INM).</u>	218
<u>Tableau 76 : Les fluctuations hygrométriques (%) tri-horaires durant l'épisode 3-5 janvier 2009. (Source des données : INM).</u>	219

<u>Tableau 77 : Les fluctuations thermiques (°C) tri-horaires le 18 juin 2009. (Source des données : INM).</u>	222
<u>Tableau 78 : Les fluctuations hygrométriques (%) tri-horaires du 16 au 18 2009. (Source des données : INM).</u>	223
<u>Tableau 79 : Les fluctuations thermiques(%) tri-horaires du 13 et 14 mai 2009. (Source des données : INM).</u>	224
<u>Tableau 80 : Les vagues de froid en décembre et nombre de crises d'asthmes correspondants. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	236
<u>Tableau 81 : Nombre de crises d'asthme survenues après une variation de l'humidité relative de 20 % et plus de la période (juin-décembre 2011). (Source des données : UOCD Ben Arous et INM).</u>	238
<u>Tableau 82 : Dates et heures des crises d'asthme survenues suite à des chutes de l'humidité relative de l'air de la période juin-septembre 2011. (Source des données : UOCD Ben Arous et INM).</u>	239
<u>Tableau 83 : Dates et heures des crises survenues suite à des chutes de l'humidité relative de l'air de la période octobre-décembre. (Sources des données : UOCD Ben Arouset INM).</u>	239
<u>Tableau 84 : Jours des pics quotidiens des crises d'asthme admis aux urgences de Ben Arous en et épisodes correspondant. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	241
<u>Tableau 85 : Résultats des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme, aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage (INM) pendant le mois de décembre. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	242
<u>Tableau 86 : Seuils optimaux de la température avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	243
<u>Tableau 87 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	243
<u>Tableau 88 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1, C2). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	244
<u>Tableau 89 : Résultats des moyennes des extrêmes climatiques des jours de pics et le jour précédent des admissions pour crises d'asthme aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage pendant le mois de décembre . (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	244
<u>Tableau 90 : Résultats des moyennes des extrêmes climatiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme et j-2, aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage pendant le mois de décembre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	245
<u>Tableau 91 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	247
<u>Tableau 92 : Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et urgences de Ben Arous).</u>	247
<u>Tableau 93 : Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	248
<u>Tableau 94 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous, les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison intermédiaire en 2009. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous)</u>	249
<u>Tableau 95 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme, aux services des urgences de Ben Arous, enregistrées à Tunis-</u>	

<u>Carthage pendant les mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	250
<u>Tableau 96 : Résultats des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme et les jour-1, aux services des urgences de Ben Arous pendant le mois d'octobre et novembre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	251
<u>Tableau 97 : Résultats des moyennes des extrêmes météorologiques des jours de pics des admissions pour crises d'asthme et j-2, aux services des urgences de Ben Arous enregistrées à Tunis-Carthage pendant les mois d'octobre et novembre 2011. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	252
<u>Tableau 98 : Seuils optimaux de la température (°C) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	253
<u>Tableau 99 : Seuils optimaux avec l'humidité relative (%) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	253
<u>Tableau 100 : Seuils optimaux avec la vitesse maximale du vent (m/s) avec les 3 indicateurs (C1, C2), (C1', C2') et (C1", C2"). (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	254
<u>Tableau 101 : Les jours de pics des admissions pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous, les paramètres météorologiques moyennés selon l'indicateur optimal et nombre de crises d'asthme pendant la saison intermédiaire en 2009. (Source des données : INM et UOCD Ben Arous).</u>	255
<u>Tableau 102 : Nombre d'hospitalisations aux urgences de Ben Arous et niveaux des moyennes journalières de l'O₃ (µg/m³) dans la station de l'ANPE du Parc Mourouj du 1^{er} juin au 30 septembre 2011. (Source des données : ANPE et UOCD Ben Arous).</u>	257
<u>Tableau 103 : Niveau de l'indice de la qualité de l'air en O₃ (µg/m³) (ANPE) pour le Grand-Tunis.</u>	259
<u>Tableau 104 : Nombre d'asthmatiques aux urgences de Ben Arous, du 21 au 24 juin 2011, selon le genre et la catégorie d'âge. (Source des données : UOCD Ben Arous).</u>	263
<u>Tableau 105 : Les fluctuations thermiques (°C) tri-horaires du 15 et 16 février 2011. (Source des données : Weather Underground).</u>	265
<u>Tableau 106 : Les fluctuations hygrométrique (%) tri-horaires du 14 au 16 décembre 2011. (Source des données : Weather Underground).</u>	266
<u>Tableau 107 : Les fluctuations thermiques (°C) tri-horaires du 15 au 17 octobre 2011. (Source des données : Weather Underground).</u>	270
<u>Tableau 108 : Les fluctuations hygrométriques (%) tri-horaires du 15 au 17 octobre 2011. (Source des données : INM).</u>	271
<u>Tableau 109 : les pathologies recensées dans le questionnaire. (Source des données : enquête spéciale).</u>	276
<u>Tableau 110 : Nombre de patients allergiques aux polluants chimiques par type de pathologie respiratoire. (Source : enquête spéciale).</u>	277
<u>Tableau 111 : Nombre de patients allergiques aux polluants biologiques par type de pathologie respiratoire. (Source : enquête spéciale).</u>	278
<u>Tableau 112 : Nombre de patients allergiques aux polluants biologiques par type de pathologie respiratoire. (Source : enquête spéciale).</u>	280
<u>Tableau 113 : Taux des patients ayant un antécédent dans la famille d'une pathologie pulmonaire et nombre total des patients par type de pathologie respiratoire. (Source des données : enquête spéciale).</u>	281

<u>Tableau 114 : Répartition des asthmatiques admis aux urgences de Ben Arous du 1^{er} juin au 31 décembre 2011 selon le niveau éducationnel et le niveau socio-économique. (Source des données : UOCD Ben Arous).</u>	283
<u>Tableau 115 : Calendrier pollinique de la ville de Tunis. (Source : El Gharbi et al., 1976).</u>	288
<u>Tableau 116 : Synthèse des principaux facteurs associés à l'exacerbation ou au développement des maladies respiratoires (pourcentage des patients ayant ce risque par rapport au total des patients de la pathologie). (Source des données : enquête personnelle).</u>	294

Table des matières

Partie I : Cadre spatial, données et approches méthodologiques.....	19
Chapitre I : Présentation du Grand-Tunis.....	20
I. 1. CADRE GEOGRAPHIQUE DU GRAND-TUNIS	20
I. 2. L'INFRASTRUCTURE SANITAIRE DANS LE GRAND-TUNIS	24
CONCLUSION	27
Chapitre II : Facteurs de risque associés aux maladies de l'appareil respiratoire	29
II. 1. LES MALADIES DE L'APPAREIL RESPIRATOIRE.....	29
II. 2. LA BIOMETEOROLOGIE DU FROID ET DE LA CHALEUR	34
II. 3. POLLUTION DE L'AIR ET SES IMPACTS NEGATIFS SUR LA SANTE RESPIRATOIRE	36
II. 4. L'IMPORTANCE DE L'ATOPIE, DU NIVEAU SOCIOECONOMIQUES ET LE TYPE DE PROFESSION SUR LA SANTE RESPIRATOIRE.....	39
Chapitre III : Données de base et méthodes	42
III. 1. LES DONNEES : SOURCES ET QUALITE	42
III. 2. APPROCHES METHODOLOGIQUES	48
Chapitre IV : Facteurs de risque météorologiques.....	51
IV. 1. LES EXTREMES THERMIQUES	51
IV. 2. LE VENT DANS LE GRAND-TUNIS ET SON IMPACT.....	64
IV. 3. UNE DUREE D'ENSOLEILLEMENT IMPORTANTE	72
IV. 4. L'HUMIDITE : CARACTERISTIQUES ET EFFETS SUR LA SANTE ET SUR LA QUALITE DE L'AIR.....	73
CONCLUSION	74
Conclusion de la première partie	76
Partie II.....	77
Chapitre V : Pollution atmosphérique dans le Grand-Tunis : sources, réglementations et stations de mesure	78
V. 1. DEFINITIONS, SOURCES ET REGLEMENTATIONS DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE	78
V. 2. LES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES PROBLEMATIQUES : O ₃ ET PM10	90
V. 3. LES REGLEMENTATIONS DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE.....	92
V. 4. LE RESEAU DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR DANS LE GRAND- TUNIS	93
CONCLUSION	106

Chapitre VI : Variabilité spatiale et temporelle des polluants d’ozone et des particules en suspension dans le Grand-Tunis	107
VI. 1. LES FACTEURS DE VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE	107
VI. 2. TENDANCE GENERALE DES CONCENTRATIONS DES POLLUANTS : O ₃ ET PM10	112
VI. 3. INFLUENCE DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES SUR LA VARIABILITE TEMPORELLE DES EXTREMES JOURNALIERS DES POLLUANTS : O ₃ ET PM10	116
CONCLUSION	118
Chapitre VII : Épisodes photochimiques et types de temps dans le Grand-Tunis	120
VII. 1. LES DEPASSEMENTS DES NORMES TUNISIENNES RELATIVES À L’O ₃	120
VII. 2. LES ÉPISODES PHOTOCHIMIQUES	127
CONCLUSION	140
Chapitre VIII : Épisodes de pollution aux PM10 et type de temps dans le Grand-Tunis ...	141
VIII. 1. LES DEPASSEMENTS DES NORMES TUNISIENNES RELATIVES AUX PM10	141
VIII. 2. LES EPISODES DE POLLUTION PARTICULAIRES	144
CONCLUSION	156
Conclusion de la deuxième partie	157
Partie III : Santé respiratoire, situations atmosphériques à risque et impact de la pollution de l’air	158
Chapitre IX : Mise en évidence d’un indicateur et de seuils prédictifs d’un impact sanitaire respiratoire	159
IX. 1. SITUATION DE TENSION DANS LES SERVICES SANITAIRES ET SEUILS CRITIQUES DES ADMISSIONS QUOTIDIENNES	159
IX. 2. MATERIEL ET METHODE	160
CONCLUSION	163
Chapitre X : Les consultations externes à la Rabta : variabilité des pathologies respiratoires et impact du climat.....	164
X. 1. VARIABILITE TEMPORELLE DES CONSULTATIONS EXTERNES A L’HOPITALLA RABTA.....	164
X. 2. VARIABILITE DES CONSULTATIONS SELON LES CONDITIONS CLIMATIQUES EXTREMES ET LA POLLUTION DE L’AIR.....	169
CONCLUSION	171
Chapitre XI : Les effets des conditions climatiques et des polluants atmosphériques sur les admissions hospitalières aux urgences La Rabta.....	173
XI. 1. DESCRIPTION DES ADMISSIONS HOSPITALIERES SELON LA PATHOLOGIE ET L’AGE	173
XI. 2. REPARTITION TEMPORELLE DES HOSPITALISATIONS ET DES TYPES DE PATHOLOGIES RESPIRATOIRES AUX URGENCES LA RABTA	177
XI. 3. INDICATEURS ET SEUILS PREVISIONNELS D’EXCES D’HOSPITALISATION POUR PATHOLOGIES RESPIRATOIRES AUX URGENCES LA RABTA	181

XI. 4. SEUILS BIOMETEOROLOGIQUES DES EXTREMES METEOROLOGIQUES DE LA SAISON FROIDE	184
XI. 5. SEUILS BIOMETEOROLOGIQUES DES EXTREMES METEOROLOGIQUES DE LA SAISON CHAUDE	197
XI. 6. SEUILS BIOMETEOROLOGIQUES DES EXTREMES METEOROLOGIQUES DE LA SAISON INTERMEDIAIRE.....	203
XI. 7. ESTIMATION DE L'IMPACT SANITAIRE DE LA POLLUTION EN PM10 SUR L'ADMISSION HOSPITALIERE AUX URGENCES LA RABTA.....	211
XI. 8. TYPES DE TEMPS DES JOURS DE PICS DES ADMISSIONS HOSPITALIERES ...	217
CONCLUSION	226
Chapitre XII : Crises d'asthme : climat, type de temps et pollution de l'air.....	227
XII. 1. LES CRISES D'ASTHME : CARACTERISTIQUES ET FACTEURS	227
XII. 2. LES FACTEURS DE DECLENCHEMENT DES CRISES D'ASTHME DES CONSULTANTS AUX URGENCES DE BEN AROUS.....	231
XII. 3. UNE GRANDE VARIABILITE DES CRISES D'ASTHME DANS LE TEMPS	231
XII. 4. ASSOCIATION ENTRE CRISES D'ASTHME ET VARIABLES METEOROLOGIQUES	233
XII. 5. INDICATEURS ET SEUILS PREVISIONNELS D'EXCES 'ADMISSION POUR CRISES D'ASTHME AUX URGENCES DE BEN AROUS.....	240
XII. 6. ESTIMATION DE L'IMPACT SANITAIRE DE POLLUTION PHOTOCHIMIQUE SUR LES ADMISSIONS POUR CRISES D'ASTHME AUX URGENCES.....	255
XII. 7. TYPES DE TEMPS DES JOURS DE PICS DES ADMISSIONS POUR CRISES D'ASTHME.....	264
CONCLUSION	273
Chapitre XIII : Les facteurs de risque environnementaux pour la santé respiratoire et la particularité de l'allergie dans le Grand-Tunis.....	275
XIII. 1. PRESENTATION DE L'ENQUETE SPECIALISEE.....	275
XIII. 2. LES FACTEURS DE RISQUE ENVIRONNEMENTAUX	276
XIII. 3. LES FACTEURS DE RISQUE INDIVIDUELS.....	280
XIII. 4. INFLUENCE DES NIVEAUX EDUCATIONNEL ET SOCIO-ECONOMIQUE SUR LA MALADIE RESPIRATOIRE	283
XIII. 5. SPECIFICITE DE L'ALLERGIE DANS LE GRAND-TUNIS.....	285
CONCLUSION	291
Conclusion de la troisième partie	293
Conclusion générale.....	295
Références bibliographiques.....	301
Bases de données en ligne	311
Table des figures	313
Table des tableaux.....	323
Table des matières	330
Annexes	333

Annexes

Annexe I : Total des observations, des lacunes (en heures) et le pourcentage des lacunes des quatre polluants (O₃, PM10, NO₂ et SO₂) issues des huit stations dans le Grand-Tunis entre 2005 et 2011. (Source : ANPE).

O₃

Années	2005			2006			2007			2008			2009			2010			2011			
	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	
Bab Saadoun	8145	615	7	7454	1276	14.6	6906	1854	17.2	6098	3686	42	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Parc Mourouj	8327	433	4.9	X	X	X	6666	3094	35.3	2367	6427	73.2	X	X	X	7178	1582	18.1	X	X	X	X
Ben Arous	2574	6186	70.61	X	X	X	7258	1802	X	8013	771	9	X	X	X	4261	4499	51.4	X	X	X	X
Radès	2340	6420	73.3	X	X	X	7620	1140	13	7587	1197	13.6	X	X	X	4452	4308	49.2	X	X	X	X
La Manouba							X	X	X	6970	1814	20.7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Parc Ennahli	X	X	X	X	X	X	8578	182	2	8560	234	2.7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ghazala							X	X	X	7516	1267	14	X	X	X	6195	2655	29.3	X	X	X	X
Bab Alioua							X	X	X	6169	2615	29.8	X	X	X	4345	4415	50.4	X	X	X	X

PM10

Années	2005			2006			2007			2008			2009			2010			2011			
	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	
Bab Saadoun	7946	814	9.3	7544	1216	15.6	7940	856	9.8	6916	1868	21.3	X	X	X	59.4	5200	3560	X	X	X	X
Parc Mourouj	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ben Arous	X	X	X	X	X	X	X	X	X	8042	742	8.5	X	X	X	58.3	5107	3653	X	X	X	X
Radès	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
La Manouba							X	X	X	X	1726	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Parc Ennahli	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ghazala							X	X	X	7754	1030	11.7	X	X	X	34.2	2994	5766	X	X	X	X
Bab Alioua							X	X	X	8163	621	7.1	X	X	X	50.5	4334	4426	X	X	X	X

SO₂

Années	2005			2006			2007			2008			2009			2010			2011			
	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	
Bab Saadoun	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Parc Mourouj	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ben Arous	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Radès	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
La Manouba							X	X	X	3540	876	20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Parc Ennahli	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ghazala							X	X	X	7801	983	11.2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bab Alioua							X	X	X	X	X	X	X	X	X	4426	4334	49.5	X	X	X	X

NO₂

Années	2005			2006			2007			2008			2009			2010			2011			
	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	Total d'observations (heures)	Total des lacunes (heures)	Lacunes %	
Bab Saadoun	7997	763	8.7	7284	1476	16.9	7003	1757	20.1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Parc Mourouj	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ben Arous	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Radès	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
La Manouba							X	X	X	3410	1006	23	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Parc Ennahli	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ghazala							X	X	X	7263	1521	17.3	X	X	X	6593	2167	25	X	X	X	X
Bab Alioua							X	X	X	7730	1054	12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Caractéristiques épidémiologiques et bioclimatiques de l'asthme aux urgences

Date d'admission : Heure d'admission :
 Date de sortie : Heure de sortie :
 N° consultation aux urgences durant la période de l'étude : 1^{ère} ; 2^{ème} ; 3^{ème} ; 4^{ème} ; 5^{ème}

Données démographiques :

- Nom et prénom : Age sexe : M F
- Profession :
- Bas niveau socioéconomique (faible revenu ou impossibilité d'acheter son traitement)
- Niveau éducationnel : bas moyen élevé
(Primaire) (Secondaire) (Supérieure)
- Adresse (Rue, ville) :

Antécédents et habitudes :

- Tabagisme (cigarette ou chicha) : actif Pqts / années :
 Passif : N années d'exposition :
- Antécédent d'une pathologie pulmonaire dans la famille oui non
- Notion d'allergie : cutanée Alimentaire médicamenteuse Autres :
- Facteur allergène : pollen poussière polluant chimique

Maladie asthmatique :

- Ancienneté : ans
- Hospitalisation pour CA : oui nombre : Lieu : Méd Réa
- Consultation aux urgences : < 15 j 15j - 30 j > 1 mois
- Nombre de consultation aux urgences les 6 derniers mois :
- Contrôle de la maladie asthmatique les 4 dernières semaines : contrôlée partiellement contrôlée non contrôlée

Exacerbation aigue actuelle :

- Heure de la crise : Lieu de la crise : travail domicile autres
- Adresse du survenu de la crise :
- En cas d'exposition à un allergène :
 - Polluant chimique (pollution industrielle, automobile, détergent...)
 - Polluant biologique : poussière pollens
 - Eléments climatiques : chaleur froid vent
 Autres :

Exacerbation aigue actuelle :

- Heure de la crise :
- Lieu de la crise : travail domicile autres
- Facteurs déclenchants : arrêt corticoïdes per os ou corticoïdes inhalés
 infections respiratoires exposition à un allergène à un médicament :
 Autres :
- Gravité de l'exacerbation (DEP) : légère modérée grave
(DEP > 30%) (DEP : 60 - 30 %) (DEP < 60 %)
 Si DEP non disponible, gravité clinique : légère à modérée sévère
- Evolution : hospitalisation : UHCD Médecine Réa Retour à domicile Décès

Annexe III : La fiche du questionnaire

**QUESTIONNAIRE D'ENQUETE
LES FACTEURS IRRITANTS DES MALADIES RESPIRATOIRES**

IDENTIFICATION DU PATIENT (تعريف المريض)

Sexe (الجنس): F Âge (العمر):

Profession (المهنة):..... Adresse (العنوان):
.....

Tabac (التدخين) (fume ou avait déjà fumé): O N

N° cigarette/jour :..... Age du début du tabac:

Type de maladie (المرض): Age de l'apparition de la
maladie :.....

Antécédents d'une pathologie respiratoire dans la famille non oui
.....

LES FACTEURS IRRITANTS (العوامل المؤثرة)

Polluants chimiques (الملوثات الكيميائية) (un ou plusieurs facteurs) :

La pollution des industries (مان المصانع دخان)

La pollution automobiles (سيارات)

Le Climatisation (وسائل التدفئة)

Les cosmétiques (ستحضرات التجميل)

Les détergents (مواد التنظيف)

Polluants biologiques (الملوثات البيولوجية) :

▪ Humidité à domicile (الرطوبة) Les acariens (الغبار) la poussière
(الغبار)

▪ Les pollens (غبار الطلع):

Graminées

Herbacée (يش)

Céréale (الخبز)

Olivier (الزيتون)

Cyprès (السرول)

Les éléments climatiques irritants (العوامل المناخية) (un ou plusieurs facteurs) :

La chaleur (الحرارة)

Le froid (برودة)

Le vent (الرياح)

L'humidité (الرطوبة)

La pluie (لمطر)

Autres facteurs :

Les saisons gênantes :

Printemps

été

automne

hiver

COORDONNEES DE L'OBSERVATION

Date (jour, mois, année) |

| | | |

Lieu :

Annexe IV : Le parc véhicule sur roues dans le Grand Tunis entre 2005 et 2009. (*Source des données : ATTT, 2010*).

Genre	2005	2006	2007	2008	2009
Appareil agricole	341	350	360	368	383
Camion	11312	11629	12077	12473	12922
Camionnette	68233	73307	79848	86917	95536
Engin de travaux publics	1377	1633	2001	2478	3028
Engin spécial	782	966	1246	1653	2130
Moto	398	412	413	416	418
Motocyclette	2785	2916	3072	3226	3343
Quadricycle	113	151	211	281	362
Remorque	841	852	865	872	874
Remorque agricole	130	131	132	133	133
Semi-remorque	8228	8612	9220	9942	10799
Semi-remorque agricole	5620	5796	5949	6116	6228
Tcp	7125	7459	7801	8161	8509
Tracteur agricole	13924	14268	14590	15108	15524
Tracteur routier	4725	4959	5376	5855	6430
Tricycle	56	56	58	60	60
Véhicule intervention urgente	209	280	293	334	377
Véhicule très spécial	4685	4721	4731	4731	4732
Véломoteur	750	884	953	1037	1156
Voiture mixte	6499	8315	10432	12767	15208
Voiture particulière	267602	285768	307693	333055	361917
Total	405735	433465	467321	505983	550069

Annexe V : Répartition du parc véhicule du grand Tunis par âge au 31/12/2009.
(Source : ATTT, 2010)

GENRE	10 ans et plus	5-10 ans	0-5 ans
Appareil agricole	309	32	42
Camion	9058	2101	1763
Camionnette	48054	19831	27651
Engin de travaux publics	319	842	1867
Engin spécial	180	503	1447
Moto	344	43	11
Motocyclette	364	499	536
Quadricycle	2308	51	310
Remorque	1	43	34
Remorque agricole	797	7	2
Semi-remorque	124	2622	2808
Semi-remorque	5369	1211	775
TCP	4242	1405	1624
Tracteur agricole	5480	34	1753
Tracteur routier	47	2276	1808
Tricycle	11495	1398	1
Véhicule intervention	3224	10	219
Véhicule très spécial	49	146	48
Véломoteur	12	1162	532
Voiture mixte	3522	121	9972
Voiture particulière	503	2810	104706
Total	95801	37147	157909

Annexe VI : Les jours de dépassement de la valeur limite relative à l'O₃ (235µg/m³) de la période 2005-2011. (*Source des données : ANPE*).

Date	Jour de la semaine	Heure	O ₃ (µg/m ³)
29/08/2008	vendredi	16 :00	513
29/08/2008	vendredi	15:00	443
29/08/2008	vendredi	14:00	361
31/08/2008	dimanche	07:00	317
29/08/2008	vendredi	17:00	309
29/08/2008	vendredi	13:00	285
31/08/2008	dimanche	06:00	275
27/08/2008	mercredi	14:00	271
31/08/2008	dimanche	05:00	261
01/05/2008	jeudi	02:00	251
27/04/2008	dimanche	17:00	249
01/05/2008	jeudi	03:00	249
01/05/2008	jeudi	04:00	249
27/04/2008	dimanche	18:00	247
29/04/2008	mardi	15:00	247
29/04/2008	mardi	16:00	247
30/04/2008	mercredi	22:00	247
30/04/2008	mercredi	23:00	247
27/04/2008	dimanche	16:00	245
30/04/2008	mercredi	17:00	245
27/04/2008	dimanche	13:00	243
27/04/2008	dimanche	14:00	243
27/04/2008	dimanche	15:00	243
30/04/2008	mercredi	18:00	243
01/05/2008	jeudi	01:00	241
29/04/2008	mardi	19:00	239
27/04/2008	dimanche	12:00	237
29/04/2008	mardi	18:00	237
27/04/2008	dimanche	11:00	235
30/06/2005	Jeudi	13 :00	257
29/07/2005	vendredi	20 :00	255
29/07/2005	vendredi	21 :00	253
30/07/2005	Samedi	00 :00	249
02/08/2005	Mardi	09 :00	239
13/06/2007	Mercredi	07 :00	239

23/07/2007	Lundi	07 :00	239
24/07/2007	Mardi	07 :00	255
21/11/2007	Mercredi	10 :00	251
17/06/2010	Jeudi	21 :00	237
17/06/2010	jeudi	19 :00	257
18/06/2010	vendredi	07 :00	275
01/07/2010	jeudi	00 :00	263
01/07/2010	jeudi	01 :00	237
23/06/	jeudi	07 :00	350
21/06/	mardi	07 :00	268
17/06/	vendredi	07 :00	266
22/06/	mercredi	07 :00	248
24/06/	vendredi	07 :00	244
28/06/	mardi	22 :00	244
26/06/2006	Lundi	01 :00	240
26/06/2006	Lundi	00 :00	238
26/06/2006	Lundi	02 :00	240
28/06/2006	Mercredi	00 :00	236
29/06/2006	Jeudi	02 :00	246

Annexe VII : Seuil biométéorologique, des extrêmes météorologiques, d'excès d'admission hospitalière aux urgences la Rabta

VII. 1. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1, C2) pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et archives des urgences La Rabta).

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
17	33	4	7	36,4	62	0	1-4-8
19	31	1	10	9,1	35	2,8	8
20	34	4	7	36,4	61	1,6	4-5-7-9
22	38	7	4	63,6	52	0	3-4-6-7-9
23	32	2	9	18,2	4	85,2	4-9
24	37	4	7	36,4	30	6,3	3-6-7
24	35	3	8	27,3	19	24	6-7
24	34	1	10	9,1	16	46,7	7
25	44	1	10	9,1	19	0	2

VII. 2. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1, C2) pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Hmin (%)	Tmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
11	78	4	7	36,4	36	0	2-3-4-8
21	74	2	9	18,2	17	15	3-8
21	73	1	10	9,1	14	12,5	8
22	88	4	7	36,4	58	1,7	1-4-5-7
29	88	3	8	27,3	46	14,8	4-5-7
30	94	6	5	54,5	77	22,2	3-4-6-7-9
31	89	2	9	18,2	49	5,8	4-7-9
32	89	1	10	9,1	44	10,2	4-7
34	94	3	8	27,3	61	4,7	3-7
40	78	1	10	9,1	4	90,9	4
44	83	1	10	9,1	3	92,7	7

VII. 3. Seuils optimaux du vent (m/s) avec l'indicateur (C1, C2) pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta).

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
4	1	10	9,1	8	92,8	1-2
5	3	8	27,3	22	80,9	1-2-5
6	6	5	54,5	46	57,8	1-2-5-6-8-9
7	8	3	72,7	75	32,4	1-2-3-5-6-8-9
8	10	1	90,9	87	21,6	1-2-3-4-5-6-7-8-9
9	11	0	100,0	100	9,9	1-2-3-4-5-6-7-8-9

VII. 4. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1', C2') pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta).

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
18	34	5	6	45,5	77	1,3	1-4-5-8-9
20	30	1	10	9,1	25	30,6	8
21	34	3	8	27,3	45	2,2	4-5-9
21	36	7	4	63,6	66	0	3-4-5-6-7-9
22	31	1	10	9,1	6	76	9
23	38	5	6	45,5	40	2,4	3-4-6-7-9
24	42	5	6	45,5	35	35,2	2-4-6-7
24	33	1	10	9,1	8	74,2	4
24	36	4	7	36,4	27	10	4-6-7
24	35	2	9	18,2	19	24	7
25	36	1	10	9,1	13	27,8	7

VII. 5. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1', C2') pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta).

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
16	76	2	9	18,2	19	82,7	2-8
23	94	10	1	90,9	98	0	1-3-4-5-6-7-8-9
28	79	2	9	18,2	26	29,7	3-8
28	84	6	5	54,5	39	50	3-4-5-7-8
28	76	1	10	9,1	13	50	8
30	83	1	10	9,1	29	29,3	5
31	84	2	9	18,2	29	27,5	4-7
31	94	4	7	36,4	75	53,7	6-7-9
34	84	1	10	9,1	21	50	4
37	86	2	9	18,2	12	64,7	7-9
38	86	1	10	9,1	16	59	7

VII. 6. Seuils optimaux du vent (m/s) avec l'indicateur (C1', C2') pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
5	3	8	27,3	22	80,9	2-5-9
6	6	5	54,5	46	57,8	1-2-3-5-7-9
7	8	3	72,7	75	32,4	1-2-3-5-6-7-9
8	9	2	81,8	87	21,6	1-2-3-5-6-7-8-9
9	11	0	100	100	9,9	1-2-3-4-5-6-7-8-9

VII. 7. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1", C2") pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
20	33	5	6	45,5	47	7,8	1-4-5-8-9
20	29	1	10	9,1	19	42,4	8
21	33	2	9	18,2	31	11,4	4-5-9
22	35	5	6	45,5	36	2,7	3-4-6-7-9
22	36	7	4	63,6	47	2,1	3-4-6-7-9
22	30	1	10	9,1	3	89,3	9
23	40	5	6	45,5	43	0,0	2-4-6-7
23	35	3	8	27,3	27	12,9	6-7
24	33	2	9	18,2	8	74,2	4
25	35	1	10	9,1	8	57,9	7
25	36	1	10	9,1	13	27,8	7

VII. 8. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1", C2") pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta).

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
19	84	6	5	54,5	51	0	2-3-5-7-8
22	89	9	2	81,8	71	0	1-3-4-5-7-8-9
27	78	2	9	18,2	26	27,8	3-8
28	96	8	3	72,7	86	3,4	3-4-5-6-7-8-9
30	84	4	7	36,4	31	42,6	3-5-7-8
33	81	2	9	18,2	12	64,7	5-8
34	78	1	10	9,1	11	69,4	8
35	87	4	7	36,4	17	55,3	4-7-9
35	83	1	10	9,1	16	59	4-7-9
39	87	2	9	18,2	9	74,3	4-9
45	87	1	10	9,1	3	94,6	9

VII. 9. Seuils optimaux du vent (m/s) avec l'indicateur (C1", C2") pendant la saison chaude (juin-septembre 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
6	4	7	36,4	46	57,8	1-3-7-9
7	9	2	81,8	75	32,4	1-2-3-5-6-7-8-9
8	10	1	90,9	87	21,6	1-2-3-5-6-7-8-9
9	11	0	100	100	9,9	1-2-3-4-5-6-7-8-9

VII. 10. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1, C2) pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril, mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
11	18	2	16	11,1	9	11,1	1-2-4
11	15	1	17	5,6	0	0	2-4
11	22	7	11	38,9	41	6,1	1-2-3-4-7-8-11-12
12	15	1	17	5,6	0	0	4.
12	26	14	4	77,8	62	0	4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14
12	19	2	16	11,1	12	14,1	4-7
13	22	2	16	11,1	25	12,5	8-11-12
13	23	4	14	22,2	33	10,3	8-9-10-11
15	31	7	11	38,9	46	0	11-12-13-14
15	21	1	17	5,6	0	0	11
17	24	4	14	22,2	9	13,3	12-14
17	22	1	17	5,6	4	28,8	12
18	24	2	16	11,1	4	23,8	12

18	26	2	16	11,1	9	12,2	12-13-14
19	24	1	17	5,6	0	0	14

VII. 11. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1, C2) pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril, mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Hmin (°C)	Hmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
28	88	9	9	50	37	4,1	3-4-6-8-9-10-11-12
31	94	15	3	83,3	70	1	2-4-5-6-7-8-9-10-11-12-14
32	100	17	1	94,4	91	0	1-2-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13
36	94	14	4	77,8	66	1	1-2-4-5-6-7-8-9-10-11-12
38	94	13	5	72,2	66	5,1	2-4-5-6-7-8-9-10-11-12
41	88	8	10	44,4	30	15,5	4-6-8-9-10-11-12
53	88	7	11	38,9	17	28,6	6-8-9-10-11-12
54	83	1	17	5,6	1	88	8
56	88	4	14	22,2	10	39,6	8-9-10
57	94	7	11	38,9	24	14,6	2-5-8-10-12
57	88	3	15	16,7	10	45,1	8-10
60	94	4	14	22,2	15	16	2-12
67	94	3	15	16,7	6	22,2	2-12
68	88	1	17	5,6	1	110	12
77	100	2	16	11,1	4	0	1-2
77	94	1	17	5,6	1	40	2

VII. 12. Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1, C2) pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril, mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
------------	--------------	---------------	-----------------	------------------	-----------------	-----------------

4	3	15	16,7	22	85,7	3-12-13
5	7	11	38,9	28	78,7	2-3-5-9-11-12
6	10	8	55,6	46	59,3	2-3-4-5-8-9-10-11-12-13
7	14	4	77,8	67	37,6	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14
9	17	1	94,4	89	15,2	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-13-14
12	18	0	100,0	101	3,0	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14

VII. 13. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1', C2') pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril, mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
11	17	3	15	16,7	5	13,2	1-2-12
11	25	16	2	88,9	57	1	1-2-3-4-5-6-8-9-10-11-12-13-14
12	17	3	15	16,7	4	20	1-2-12
12	21	4	14	22,2	17	10,6	1-2-12
13	24	8	10	44,4	37	3,1	3-4-5-9-10-11-14
13	23	4	14	22,2	24	10,4	4-5-9-14
14	24	6	12	33,3	25	4,2	4-5-9-10-11
14	22	1	17	5,6	14	13,9	4
14	23	2	16	11,1	22	11,5	4-5-9
15	24	2	16	11,1	17	5,3	8-9-10-11
16	30	6	12	33,3	35	0	7-8-9-10
17	23	1	17	5,6	7	22,9	9
17	24	2	16	11,1	9	13,3	9-10
18	25	2	16	11,1	4	18,8	6-8
19	26	2	16	11,1	5	20,4	8
19	25	1	17	5,6	0	0	8

VII. 14. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1', C2') pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril, mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausses alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
39	94	16	2	88,9	66	5,1	2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-14
41	91	13	5	72,2	30	15,5	3-4-5-6-8-9-10-11-12-14
41	100	17	1	94,4	79	0	1-2-3-4-5-6-8-9-10-11-12-13-14
42	83	1	17	5,6	11	21,8	4
44	91	11	7	61,1	28	12,4	2-3-5-6-8-9-10-11-12
45	94	12	6	66,7	56	8,1	2-5-6-8-9-10-11-12
45	91	10	8	55,6	26	10,4	5-6-8-9-10-11-12
46	88	3	15	16,7	25	19,8	6-8-9-10-12
54	89	5	13	27,8	11	33,8	8-9-10-12
55	86	2	16	11,1	1	94	8-9
55	91	8	10	44,4	10	36,3	5-8-9-10-12
56	86	1	17	5,6	1	100	8
57	88	2	16	11,1	10	45,1	10-12
58	88	1	17	5,6	7	50,3	12
64	91	2	16	11,1	3	65,3	12
68	91	1	17	5,6	1	110	12
68	94	1	17	5,6	6	22,2	2-12
83	100	1	17	5,6	1	0	1

VII. 15. Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1', C2') pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril, mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

max (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
4	2	16	11,1	22	85,7	11-13
5	3	15	16,7	28	78,7	2-11-13
6	7	11	38,9	46	59,3	2-4-5-11-12-13-14
7	10	8	55,6	67	37,6	1-2-3-4-5-10-11-12-13-14
8	16	2	88,9	73	31,4	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14
9	18	0	100	89	15,2	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14

VII. 16. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1", C2") pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril et mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
11	18	4	14	22,2	9	11,1	1-2-12

11	24	13	5	72,2	56	2	1-2-3-4-5-9-10-11-12-13-14
11	17	1	17	5,6	5	13,2	12
11	19	5	13	27,8	16	9,6	1-2-12
12	18	1	17	5,6	8	16,9	2
13	22	3	15	16,7	25	12,5	3-14
13	21	1	17	5,6	14	18,2	3
13	23	8	10	44,4	34	10,3	3-4-5-9-10-11-14
14	22	1	17	5,6	14	15	5
15	23	4	14	22,2	14	12,9	9-10-11
16	25	4	14	22,2	12	7,6	6-9-10
17	29	5	13	27,8	27	5,2	7-8-9-10
17	23	2	16	11,1	7	22,9	9-10
19	27	2	16	11,1	6	18,7	8
19	25	1	17	5,6	0	0	8

VII. 17. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1", C2") pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril et mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
38	81	1	17	5,6	3	21,3	4
40	90	9	9	50,0	30	15,5	5-7-8-9-10-12-14
42	90	7	11	38,9	30	16,5	5-8-9-10-12-14
43	92	10	8	55,6	30	17,6	6-8-9-10-11-12
46	100	14	4	77,8	70	0,0	1-2-3-5-8-9-10-11-12-13
47	92	9	9	50,0	24	20,8	8-9-10-11-12
52	94	11	7	61,1	44	10,2	2-3-5-8-9-10-11-12
54	88	6	12	33,3	11	33,8	5-8-9-10-12
55	88	4	14	22,2	10	36,3	8-9-10-12
55	86	2	16	11,1	10	60,5	9-10
56	86	1	17	5,6	10	63,8	10
56	92	4	14	22,2	10	39,6	8-10
57	94	3	15	16,7	19	14,7	3
61	88	1	17	5,6	3	62,7	12
65	92	1	17	5,6	1	106,0	12
68	94	1	17	5,6	6	22,2	2
76	100	1	17	5,6	4	0,0	1

VII. 18. Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1", C2") pendant la saison intermédiaire (octobre, novembre, avril, mai 2009). (Source des données : INM et Urgences La Rabta)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
4	2	16	11,1	22	85,7	11-13
5	3	15	16,7	28	78,7	11-13-14
6	5	13	27,8	46	59,3	2-4-11-13-14
7	10	8	55,6	67	37,6	2-3-4-5-9-11-12-13-14
8	15	3	83,3	73	31,4	1-2-3-4-5-6-7-8-9-11-12-13-14
9	17	1	94,4	89	15,2	1-2-3-4-5-6-7-8-9-11-12-13-14
10	18	0	100,0	95	9,1	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14

Annexe VIII : Indicateurs et seuils prévisionnels d'excès d'admission pour crises d'asthme aux urgences de Ben Arous

VIII. 1. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1', C2') du mois de décembre 2011. (Source des données : INM et urgences de Ben Arous)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	Sensibilité (%)	Fausse alertes (jour)	Spécificité (%)	Episodes prévus
9	19	4	2	66,7	6	40	1-2-3
9	20	4	2	66,7	8	20	1-2-3
11	20	2	4	33,3	19	5	1-3
12	19	2	4	33,3	15	0	1-2-3-4
12	18	4	2	66,7	12	14,3	1-2-3-4
12	16	6	0	100	10	47,4	4

VIII. 2. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1', C2') du mois de décembre 2011. (Source des données : INM et urgences de Ben Arous)

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
53	91	2	4	33,3	4	60	1-2
39	94	6	0	100	23	0	1-2-3-4
51	91	3	3	50	9	25	1-2-3
49	91	4	2	66,7	10	16,7	1-2-4
57	94	2	4	33,3	9	0	3-4
59	85	1	5	16,7	3	82,4	4

VIII. 3. Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1', C2') du mois de décembre 2011. (Source des données : INM et Urgences de Ben Arous)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
5	1	5	16,7	8	68	2
7	4	2	66,7	18	28	1-2-3
8	5	1	83,3	23	23,3	1-2-3
9	6	0	100	26	16,1	1-2-3-4

VIII. 4. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1", C2") du mois de décembre 2011. (Source des données : INM et Urgences de Ben Arous)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
9	19	5	2	83,3	6	40	1-2-3
10	20	5	5	83,3	11	8,3	3
10	16	2	4	33,3	6	60	1-3-4
10	15	1	5	16,7	6	62,5	1-2-3-4
11	19	2	2	66,7	12	7,7	1-3

VIII. 5. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1", C2") du mois de décembre 2011. (*Source des données : INM et Urgences de Ben Arous*)

H min (%)	H max (%)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
55	92	2	4	33,3	7	50	1-4
42	94	6	0	100	23	0	1-2-3-4
49	90	2	4	33,3	10	16,7	2-4
51	92	4	2	66,7	9	25	1-2-3-4
53	92	3	3	50	8	42,9	1-3-4
56	88	1	5	16,7	11	38,9	4

VIII. 6. Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1", C2") du mois de décembre 2011. (*Source des données : INM et urgences de Ben Arous*)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
4	1	5	16,7	4	84	2
6	3	3	50	11	56	1-2-3
7	4	2	66,7	18	28	1-2-3
8	6	0	100	23	23,3	1-2-3-4

VIII. 7. Seuils optimaux de la température avec l'indicateur (C1, C2) des mois d'octobre et de novembre 2011. (*Source des données : INM et urgences de Ben Arous*)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
14	22	1	4	20	20	4,8	1-2-3
13	23	5	0	100	25	0	1-2-3
16	23	4	1	80	8	27,3	2

14	23	3	2	60	23	0	1-3
14	25	1	4	20	29	0	1-3

VIII. 8. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1, C2) des mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et urgences de Ben Arous)

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episode s prévus
53	88	1	4	20	16	33,3	1-2
44	94	2	3	40	36	0	1-2
64	94	1	4	20	12	14,3	2
31	73	1	4	20	0	100	3
26	82	2	3	40	8	11,1	3

VIII. 9. Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1, C2) des mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et Urgences de Ben Arous)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
4	2	3	40	13	76,8	1
6	4	1	80	32	42,9	1-2-3
7	5	0	100	41	26,8	1-2-3

VIII. 10. Seuils optimaux de la température avec l'indicateur (C1', C2') des mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et Urgences de Ben Arous)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
14	22	1	4	20	20	4,8	1-2-3

14	23	3	2	60	23	28,1	1-3
17	23	1	4	20	23	0	2
14	24	4	1	80	28	12,5	1-3

VIII. 11. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1', C2') des mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et urgences de Ben Arous)

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
51	88	1	4	20	19	29,6	1
49	91	2	3	40	20	16,7	1
67	94	1	4	20	6	33,3	2
34	76	1	4	20	0	100	3
29	76	2	3	40	0	100	3

VIII. 12. Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1', C2') des mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et urgences de Ben Arous).

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
5	3	2	60	21	62,5	1-2-3
7	2	3	40	41	26,8	1-2-3
8	5	0	100	55	9,8	1-2-3

VIII. 13. Seuils optimaux de la température (°C) avec l'indicateur (C1", C2") des mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et Urgences de Ben Arous)

Tmin (°C)	Tmax (°C)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes	Spécificité (%)	Episode s prévus
-----------	-----------	--------------	---------------	-----------------	------------------	-----------------	------------------

18	21	1	4	20	1	95,8	1
14	22	4	1	80	20	4,8	1
17	22	2	3	40	4	81	1-2
14	23	3	2	60	23	0	1-3

VIII. 14. Seuils optimaux de l'humidité relative (%) avec l'indicateur (C1", C2") des mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et Urgences de Ben Arous)

Hmin (%)	Hmax (%)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes (jours)	Spécificité (%)	Episodes prévus
54	90	2	3	40	12	42,9	1
49	90	3	2	60	20	42,9	1
69	94	3	2	60	5	37,5	2
42	79	1	4	20	2	85,7	3
31	79	2	3	40	4	50	3

VIII. 15. Seuils optimaux de la vitesse maximale du vent (m/s) avec l'indicateur (C1", C2") des mois d'octobre et de novembre 2011. (Source des données : INM et Urgences de Ben Arous)

Vmax (m/s)	Jours prévus	Jours manqués	sensibilité (%)	Fausse s alertes	Spécificité (%)	Episodes prévus
6	3	2	60	32	42,9	1-2-3
7	4	1	80	41	26,8	1-2-3
9	1	0	20	59	3,3	1-2-3
