



**HAL**  
open science

# Temps et pollution atmosphérique à Bizerte : analyse multiscale

Mounir Sellami

► **To cite this version:**

Mounir Sellami. Temps et pollution atmosphérique à Bizerte : analyse multiscale. Sciences de la Terre. Université Paris Cité; Université de Sfax (Tunisie), 2023. Français. NNT : 2023UNIP7340 . tel-04836955

**HAL Id: tel-04836955**

**<https://theses.hal.science/tel-04836955v1>**

Submitted on 13 Dec 2024

**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.

**Université Paris Cité****en cotutelle avec****Université de Sfax****Temps et pollution atmosphérique à Bizerte :  
Analyse multiscalaire****Par Mounir SELLAMI****Thèse de doctorat en « Dynamique des milieux et risques »****Dirigée par : Pr Salem DAHECH****et par : Pr Taoufik EL MELKI****Présentée et soutenue publiquement le 27 décembre 2023 devant un jury composé de**

Najiba CHKIR	Professeure	Université de Sfax	Présidente
Habib BEN BOUBAKER	Professeur	Université de la Manouba	Rapporteur
Albin ULLMANN	MCF-HDR	Université de Bourgogne	Rapporteur
Salem DAHECH	Professeur	Université Paris Cité	Directeur
Taoufik EL MELKI	Professeur	Université de Sfax	Co-Directeur
Yamna DJELLOULI	Professeure émérite	Université de Mans	Examinatrice
Véronique MICHOT	MCF	Université Paris Cité	Examinatrice
Caroline NORRANT	MCU	Université de Lille	Examinatrice

**Sfax****Année universitaire 2022-2023**

# Dédicaces

Je dédie ce travail à mes défunts père, mère, sœur et cousin qui m'ont beaucoup et incomparablement soutenu.

Aussi, je dédie ce travail à deux personnes qui ont une grande valeur pour moi. Deux personnes que j'ai perdues et à qui je garde un grand amour et une particulière pensée :

Ma nièce Syrine SELLAMI

Mon ami et frère Amor BKHAIRI

Même si je vous vois plus, vous vivez mon quotidien avec moi dans ses moindres détails.

## Remerciements

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Au début, je souhaite exprimer ma plus grande reconnaissance à mon encadrant Pr. Salem DAHECH pour m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Aussi, j'exprime ma gratitude à mon co-encadrant Pr. Taoufik ELMELKI pour m'avoir encouragé, orienté et soutenu.

Je remercie également mes enseignants du mastère Géographie « Environnement et Dynamiques Spatiales (GEDyS) » qui nous appris plein de choses très intéressantes, qui nous ont encadré que ce soit dans les dossiers de recherche ou les sorties de terrain.

Je n'oublierai pas d'être reconnaissant à mes deux collègues de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement Mme Mouna SFAXI pour son appui relationnel et M Hassen KCHIH de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE) qui n'a épargné aucun effort pour me donner accès aux informations utiles.

Je suis reconnaissant à Madame la Commissaire Régional de Développement de l'Agriculture de Bizerte, Mme Inji DOGGUI HANINI, en fonction en 2020, pour avoir accepté d'installer la station automatique DAVIS au local du CRDA.

M. Adel YOUNES m'a beaucoup soutenu et appuyé moralement et matériellement. Je n'oublierai jamais sa disposition à m'écouter et à m'appuyer aux moments les plus difficiles durant la préparation de cette thèse.

Je ne peux qu'exprimer ma grande reconnaissance à trois personnes qui m'ont appuyé par le fait d'accepter d'installer les capteurs des différents polluants et la station météorologique DAVIS chez eux : M Adnene BESBES, M Lotfi BEN HMIDA et son épouse Mme Hanene DAGDOUG.

Un remerciement particulier à M Sami CHARFI du laboratoire SYFACTE de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Sfax pour son appui et encouragement.

Le suivi, conseils et orientations des membres du Comité de Suivi Individuel (CSI), Mme Najiba CHKIR et M Nicolas MARTIN m'ont beaucoup aidé à mieux aborder les aspects techniques et méthodologiques de la thèse. Je les remercie vivement.

Une particulière pensée est réservée à mon ami, collègue et enseignant le défunt Amor BKHAIRI qui m'a soutenu pour ma décision de revenir à l'université comme étudiant.

Je suis très reconnaissant à mes collègues du parcours du doctorat de l'UMR PRODIG de l'Université Paris Cité et du laboratoire SYFACTE de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Sfax.

Je remercie aussi très chers parents, mon défunt père Ezzine et ma défunte mère Rekaya qui ont toujours été là pour moi et qui ont tout sacrifié n'épargnant ni santé, ni efforts. Ils m'ont donné un magnifique modèle de persévérance. Je suis très reconnaissant à toute ma famille.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Je dois avouer que cette thèse n'aurait pas vu le jour sans le soutien, la patience et les encouragements de mon épouse Sarra, sans oublier mes chères petits enfants Mariem et Haroun.

J'adresse aussi mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de cette thèse.

Enfin, ce travail est le fruit d'une collaboration et un appui logistique et conceptuel de la part des deux laboratoires engagés dans la gestion en cotutelle de cette thèse : le laboratoire « Système d'Informations Géographiques, Formations en Aménagement, Cartographie, Télédétection (SYFACTE) de la Faculté Lettres et Sciences Humaines de Sfax et l'Unité Mixte de Recherche « Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique » (UMR PRODIG) de la Faculté Sociétés et Humanités de l'Université Paris Cité.

Merci à toutes et à tous.



<b>CHAPITRE 2 : ZONE D'ÉTUDE, DONNEES ET METHODES .....</b>	<b>67</b>
<b>1- Milieu physique naturel.....</b>	<b>68</b>
<b>1.1- Situation géographique .....</b>	<b>68</b>
<b>1.2- Le climat.....</b>	<b>69</b>
<b>1.2.1- Températures et précipitations moyennes .....</b>	<b>69</b>
<b>1.2.2- Ciel nuageux, soleil et jours de précipitations .....</b>	<b>70</b>
<b>1.2.3- Régime du vent .....</b>	<b>71</b>
<b>1.2.4- Régime des brises thermiques .....</b>	<b>73</b>
<b>1.3- Topographie.....</b>	<b>73</b>
<b>1.4- Milieu lagunaire .....</b>	<b>75</b>
<b>2- Cadre socio-économique.....</b>	<b>75</b>
<b>2.1- Population .....</b>	<b>75</b>
<b>2.2- Activités industrielles :.....</b>	<b>76</b>
<b>2.3- Trafic routier .....</b>	<b>77</b>
<b>3- Matériels et méthodes :.....</b>	<b>80</b>
<b>3.1- Dispositif de surveillance de la pollution atmosphérique à Bizerte.....</b>	<b>80</b>
<b>3.2- Représentativité du site de la station ANPE à Bizerte .....</b>	<b>80</b>
<b>3.3- Caractéristiques de la station ANPE à Bizerte.....</b>	<b>82</b>
<b>3.4- Description des données.....</b>	<b>83</b>
<b>3.4.1- Données de l'ozone de la station ANPE durant la période 2010-2015 .....</b>	<b>83</b>
<b>3.4.2- Données des concentrations d'ozone troposphérique de la campagne de l'été 2020 .....</b>	<b>84</b>
<b>3.4.3- Données de la campagne de l'été 2021.....</b>	<b>85</b>
<b>3.4.4- Données de la campagne du printemps 2022.....</b>	<b>87</b>
<b>3.4.5- Données de la campagne de l'été 2022 et l'été 2023 .....</b>	<b>87</b>
<b>3.4.6- Données du laboratoire mobile (camion laboratoire) de l'ANPE.....</b>	<b>88</b>
<b>3.4.7- Données météorologiques de la station synoptique :.....</b>	<b>88</b>
<b>3.4.8- Données météorologiques de la station DAVIS .....</b>	<b>92</b>
<b>3.4.9- Morphologie urbaine 3D : .....</b>	<b>94</b>
<b>4- Prétraitements des données :.....</b>	<b>95</b>
<b>4.1- Contrôle de la qualité des données et détection des anomalies .....</b>	<b>95</b>
<b>4.2- Approche statistique .....</b>	<b>96</b>
<b>4.3- Croisement des données et modélisation .....</b>	<b>98</b>

<b>PARTIE 2 : TYPES DE TEMPS ESTIVAUX, BRISES THERMIQUES ET SIROCCO A BIZERTE .....</b>	<b>100</b>
<b>CHAPITRE 3 : TYPES DE TEMPS ESTIVAUX À BIZERTE .....</b>	<b>101</b>
<b>1- Classification globale de la saison chaude durant la période 1990-2022 à Bizerte :..</b>	<b>102</b>
<b>1.1- Classification globale des états de l’atmosphère de la saison chaude durant la période 1990-2022 à Bizerte.....</b>	<b>102</b>
<b>1.2- Circulations atmosphériques associées aux différents états de l’atmosphère à Bizerte à travers des exemples : .....</b>	<b>103</b>
<b>2.- Classification par mois de la saison chaude durant la période 1990-2022 à Bizerte</b>	<b>106</b>
<b>2.1- Statistiques de dépassement des seuils pour le mois de juin .....</b>	<b>109</b>
<b>2.2- Statistiques de dépassement des seuils pour le mois de juillet .....</b>	<b>112</b>
<b>2.3- Statistiques de dépassement des seuils pour le mois d’août .....</b>	<b>117</b>
<b>2.4. Statistiques de dépassement des seuils pour le mois de septembre.....</b>	<b>122</b>
<b>CHAPITRE 4 : BRISES THERMIQUES À BIZERTE : APPROCHE MULTISCALAIRE.....</b>	<b>129</b>
<b>1. Organisation spatiale de la température de l’air à Bizerte .....</b>	<b>130</b>
<b>2. L’étude des brises à une méso-échelle : quels facteurs d’influence ? .....</b>	<b>132</b>
<b>2.1. Fréquence mensuelle de la brise de mer, sa direction et sa vitesse mesurées à l’aérodrome de Sidi Ahmed .....</b>	<b>133</b>
<b>2.2. Caractéristique de la brise près de la mer mesurée par les stations fixes supplémentaires DAVIS.....</b>	<b>135</b>
<b>2.2.1. Exemple de l’épisode du 20 au 22 août 2012.....</b>	<b>135</b>
<b>2.2.2. Exemple de l’épisode du 07 août au 21 septembre 2020 .....</b>	<b>136</b>
<b>2.3. Analyse comparative des situations de brise entre la station météorologique de l’aérodrome de Sidi Ahmed et celle du centre-ville : .....</b>	<b>144</b>
<b>3. L’étude des brises à l’échelle fine : le quartier européen comme exemple .....</b>	<b>148</b>
<b>CHAPITRE 5 : SIROCCO ET TYPES DE TEMPS ASSOCIES DANS L’AGGLOMERATION DE BIZERTE .....</b>	<b>155</b>
<b>1- Résultats statistiques sur le sirocco à Bizerte .....</b>	<b>156</b>
<b>1.1- Sélection des jours de sirocco .....</b>	<b>156</b>
<b>1.2- Identification des jours de sirocco par mois .....</b>	<b>157</b>
<b>1.2.1- Les jours de sirocco pendant le mois de juin :.....</b>	<b>157</b>
<b>1.2.2- Les jours de sirocco pendant le mois de juillet :.....</b>	<b>160</b>
<b>1.2.3- Les jours de sirocco pendant le mois d’août :.....</b>	<b>162</b>

1.2.4- Les jours de sirocco pendant le mois de septembre :.....	164
2. Caractéristiques météorologiques du sirocco .....	166
3. Les types de circulation engendrant le sirocco .....	168
4. Les vents de sable associés au sirocco .....	171
4.1. Définition et genèse.....	171
4.2. Les types de circulation engendrant le vent de sable .....	173
<b>PARTIE 3 : CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE A BIZERTE</b> .....	179
<b>CHAPITRE 6 : ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DE LA VARIABILITE SPATIO- TEMPORELLE DE QUELQUES POLLUANTS A BIZERTE.....</b>	180
1- Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> ).....	182
1.1- Variabilité temporelle du SO <sub>2</sub> :.....	182
1.2- Variabilité spatiale du SO <sub>2</sub> :.....	185
2- Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ) .....	191
2.1- Variabilité temporelle du NO <sub>2</sub> : .....	191
2.2- Variabilité spatiale du NO <sub>2</sub> : .....	200
3- Les particules fines : PM <sub>2,5</sub> et PM <sub>10</sub> .....	204
3.1- Variabilité temporelle des PM : .....	204
3.2- Variabilité spatiale des PM.....	208
4- Le dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ).....	217
<b>CHAPITRE 7 : ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DE LA VARIABILITE SPATIO- TEMPORELLE DE LA POLLUTION PHOTOCHEMIQUE A BIZERTE : CAS DE L'OZONE TROPOSPHERIQUE.....</b>	226
1- La variabilité temporelle de l'ozone troposphérique.....	227
1.1- Régime des concentrations moyennes .....	228
1.1.1- Régime quotidien des concentrations moyennes d'ozone.....	228
1.1.2- Régime hebdomadaire des concentrations moyennes d'ozone : l'effet week- end.....	235
1.1.3- Régime mensuel des concentrations moyennes d'ozone .....	235
1.2- Régime des concentrations maximales d'ozone.....	237
1.3- Etude fréquentielle des nombres de dépassement des seuils de pollution par l'ozone .....	238
1.3.1- Etude fréquentielle diurne des nombres de dépassement des seuils de pollution à l'ozone.....	239

1.3.2- Etude fréquentielle hebdomadaire des nombres de dépassement des seuils de pollution à l’ozone.....	239
1.3.3- Etude fréquentielle des nombres de dépassement des seuils de pollution à l’ozone par mois.....	240
1.3.4- Etude fréquentielle des nombres de dépassements des seuils de pollution par l’ozone par direction du vent.....	241
1.3.5- Etude fréquentielle des nombres de dépassements des seuils de pollution à l’ozone par jours fériés.....	242
1.4- Concentration d’ozone et variables météorologiques :.....	243
1.5- Fortes concentrations par temps radiatif avec alternance des brises thermiques : .....	245
2- La variabilité spatiale de l’ozone troposphérique.....	246
2.1- Répartition spatiale des concentrations d’ozone troposphérique à l’échelle de l’agglomération :.....	250
2.1.1- Répartition des concentrations moyennes d’ozone troposphérique le Matin (entre 06h et 07h) :.....	250
2.1.2- Répartition des concentrations moyennes d’ozone troposphérique l’après-midi (entre 16h et 18h) :.....	251
2.1.3- Répartition des concentrations moyennes d’ozone troposphérique le soir (entre 00h et 01h) :.....	252
2.2- Répartition des concentrations d’ozone troposphérique à l’échelle du quartier européen à Bizerte :.....	256
<b>CHAPITRE 8 : MODELISATION DE LA POLLUTION PHOTOCHEMIQUE : CAS DE L’OZONE TROPOSPHERIQUE.....</b>	<b>259</b>
1- Données exploitées .....	261
2. Modélisation de la variabilité spatiale des concentrations d’ozone troposphérique à Bizerte.....	263
2.1. Choix du modèle de la régression.....	263
2.2. Simulation des concentrations de l’ozone troposphérique à Bizerte .....	271
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>279</b>
Références bibliographiques .....	284
Summary : Weather and air pollution in Bizerte : Multiscalar analysis.....	301
ملخص : الطقس والتلوث الهوائي ببينزرت : تحليل متعدد المستويات .....	302
Résumé : Temps et pollution atmosphérique à Bizerte : Analyse multiscalaire .....	303

# Liste des figures

## CHAPITRE 1

Figure 1.1. Essai de rationalisation du concept de type de temps .....	45
Figure 1.2. Schéma simplifié de la brise de mer (A) et de la brise de terre (B).....	47
Figure 1.3. Exemples de vent synoptique et de brises (littorales et orographiques) .....	48
Figure 1. 4. L'îlot de chaleur urbain et brise de campagne .....	50
Figure 1. 5. Cas du sirocco enregistré le mardi 20 juin 2023.....	51
Figure 1. 6. Cartes du géopotential 500 hPa et du vent de la date du 27/08/1977 à 12h UTC	52
Figure 1. 7. Sirocco qui transporte des poussières désertiques en provenance du Sahara vers l'Italie, le 8 février 2018 .....	52
Figure 1. 8. Échelles caractéristiques de la pollution atmosphérique .....	58
Figure 1. 9. Site web de l'ANPE relatif aux mesures de la pollution de l'air et aperçu de son contenu .....	59
Figure 1. 10. Le site de la nouvelle plateforme web pour sur la pollution atmosphérique TUN' AIR.....	60

## CHAPITRE 2

Figure 2. 1. Localisation et emprise urbaine de l'agglomération de Bizerte .....	68
Figure 2. 2. Nombre de jours par classes de températures maximales.....	69
Figure 2. 3. Nombre de jours de pluies par classes et par mois à Bizerte .....	70
Figure 2. 4. Diagramme ombrothermique de Bizerte.....	70
Figure 2. 5. Ciel nuageux, soleil et jours de précipitations à Bizerte.....	71
Figure 2. 6. Fréquence des classes de vitesse du vent par mois et rose des vents annuels moyens à Bizerte .....	71
Figure 2. 7. Roses des vents en hiver, au printemps, en été et en automne .....	72
Figure 2. 8. Fréquence mensuelle (%) des jours de brise.....	73
Figure 2. 9. Indice de végétation normalisé (NDVI) dans l'agglomération de Bizerte .....	74
Figure 2. 10. Topographie de l'agglomération de Bizerte .....	74
Figure 2. 11. Localisation et population à Bizerte .....	75
Figure 2. 12. Installations industrielles dans l'agglomération de Bizerte .....	76

Figure 2. 13. Débit journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus à Bizerte .....	77
Figure 2. 14. Fluidité du trafic habituel par intervalle de 04 heures .....	78
Figure 2. 15. Carte des moyennes de véhicules/minute circulant durant le pic matinal du trafic routier en été dans l'agglomération de Bizerte.....	79
Figure 2. 16. Carte des moyennes de véhicules/minute circulant l'après-midi en été dans l'agglomération de Bizerte .....	79
Figure 2. 17. Carte des moyennes de véhicules/minute circulant le soir en été dans l'agglomération de Bizerte .....	80
Figure 2. 18. Station fixe de surveillance de la qualité de l'air à Bizerte .....	81
Figure 2. 19. Le laboratoire mobile de suivi de la qualité de l'air de l'ANPE.....	83
Figure 2. 20. Circuit et fiches des mesures semi-itinérantes effectuées 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020 .....	84
Figure 2. 21. Circuit et fiches des mesures semi-itinérantes effectuées du 15 au 21 août 2021 .....	85
Figure 2. 22. Circuit des mesures semi-itinérantes effectuées du 19 au 21 août 2021 dans le quartier européen.....	86
Figure 2. 23. Installation des capteurs mobiles O <sub>3</sub> et NO <sub>2</sub> en tant que stations fixes .....	87
Figure 2. 24. Emplacement des stations météorologiques de Sidi Ahmed et celle installée au centre-ville.....	89
Figure 2. 25. Exemples des données météorologiques utilisées .....	89
Figure 2. 26. Exemples des données météorologiques utilisées (Infoclimat) .....	90
Figure 2. 27. Exemples des données météorologiques utilisées (NASA-MERRA2) .....	90
Figure 2. 28. Exemple de carte des émagrammes des radio-sondes .....	91
Figure 2. 29. Exemples de cartes de géopotential 500 hPa, de la température au niveau 500 hPa et du vent .....	92
Figure 2. 30. Stations météorologiques installées au centre-ville de Bizerte sur le toit du CRDA et à Zeqaq-Ezzouz dans la zone résidentielle au nord de Bizerte.....	92
Figure 2. 31. Récupération des données météorologiques de la station DAVIS installée au centre-ville.....	93
Figure 2. 32. Exemple de l'utilisation de la maquette 3D du quartier européen : Répartition spatiale des concentrations SO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte drapées sur sa maquette 3D .....	95

## CHAPITRE 3

Figure 3. 1. Carte du géopotential 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 21/09/2010 à 13 h (heure locale). .....	104
Figure 3. 2. Carte du géopotential 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 27/07/2008 à 13 h (heure locale). .....	105
Figure 3. 3. Carte du géopotential 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 23/07/2022 à 13 h (heure locale). .....	105
Figure 3. 4. Dendrogrammes respectifs de la CAH des données des mois de juin (A), juillet (B), août (C) et septembre (D) de la période 1990-2022 selon la méthode de dissimilarité « Distance euclidienne » et Méthode d'agrégation « Méthode de Ward » .....	107
Figure 3. 5. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C pour le mois de juin par jour (1990-2022) .....	109
Figure 3. 6. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C et 40°C pour le mois de juin par année (1990-2022).....	110
Figure 3. 7. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tx et température maximale moyenne avec + ou - 5°C du mois de juin (1990-2022).....	111
Figure 3. 8. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tn et température minimale moyenne avec + ou - 5°C du mois de juin (1990-2022).....	111
Figure 3. 9. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C pour le mois de juillet par jour (1990-2022) .....	113
Figure 3. 10. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C pour le mois de juillet par année (1990-2022) .....	114
Figure 3. 11. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tx et température maximale moyenne avec + ou - 5°C du mois de juillet (1990-2022).....	115
Figure 3. 12. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tn et température minimale moyenne avec + ou - 5°C du mois de juillet (1990-2022).....	116
Figure 3. 13. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C pour le mois d'août par jour (1990-2022) .....	118
Figure 3. 14. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C pour le mois d'août par année (1990-2022) .....	119
Figure 3. 15. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tx et température maximale moyenne avec + ou - 5°C du mois d'août (1990-2022).....	121
Figure 3. 16. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tn et température minimale moyenne du mois d'août avec + ou - 5°C du mois d'août (1990-2022) .....	121
Figure 3. 17. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C et 40°C pour le mois de septembre par jour (1990-2022) .....	123

Figure 3. 18. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C et 40°C pour le mois de septembre par année (1990-2022).....	124
Figure 3. 19. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tx et température maximale moyenne avec + ou – 5°C du mois de septembre (1990-2022) .....	125
Figure 3. 20. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tn et température minimale moyenne avec + ou – 5°C du mois de septembre (1990-2022) .....	125

## CHAPITRE 4

Figure 4. 1. Carte des températures relevées lors de la campagne de mesures semi-itinérantes du 17 août 2022 à 12h00 dans l'agglomération de Bizerte et ses environs .....	131
Figure 4. 2. Carte des températures de surface du 01/09/2015 à 22h10 (heure locale) avec les températures de l'air prise la nuit du 17/08/2022 à 23h45 (heure locale) .....	132
Figure 4. 3. Rose des vents montrant les directions des brises de mer septentrionales .....	133
Figure 4.4. Roses des vents par classes de vitesse enregistrés à 9h, 15h, 21h et 3h dans la station de Sidi Ahmed de Bizerte, durant la saison chaude (1990-2022) .....	135
Figure 4. 5. Anémogramme montrant l'alternance entre brise de mer, brise de lac et brise de terre l'été à Bizerte à partir de l'exemple du 22 août 2012 .....	136
Figure 4. 6. Position de la station DAVIS installée au centre-ville de Bizerte .....	137
Figure 4.7. Anémogrammes montrant l'alternance entre brise de mer et brise de terre l'été à Bizerte à partir de l'exemple du 20 au 22 août 2020.....	138
Figure 4. 8. Carte des températures de surface du 30/07/2020 à 10h54 (heure locale) .....	139
Figure 4. 9. Roses des vents par classes de vitesse enregistrés à 9h, 15h, 21h et 3h dans la station DAVIS installée au centre-ville, du 07 août au 21 septembre 2020 .....	140
Figure 4. 10. Schématisation du scénario 1 de la brise de mer venant du Nord pour la station DAVIS installée au CRDA de Bizerte .....	141
Figure 4. 11. Schématisation du scénario 2 de la brise de mer venant du Nord pour la station DAVIS installée au CRDA de Bizerte .....	141
Figure 4. 12. Carte des températures de surface au 13/08/2022 à 10h54 (heure locale).....	142
Figure 4. 13. Anémogramme montrant l'alternance entre brise de terre et brise de mer à Bizerte à partir de l'exemple du 04 septembre 2020 .....	143
Figure 4. 14. Carte du géopotential 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 04 septembre 2020 à 07 h (heure locale) .....	143
Figure 4. 15. Carte du géopotential 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 04 septembre 2020 à 13 h (heure locale) .....	144
Figure 4. 16. Comparaison des vitesses de vents enregistrées par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed et au centre-ville .....	145

Figure 4. 17. Roses des vents enregistrés par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B).....	145
Figure 4. 18. Roses des vents enregistrés à 03 h par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B) .....	146
Figure 4. 19. Roses des vents enregistrés à 09 h par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B) .....	147
Figure 4. 20. Roses des vents enregistrés à 15 h par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B) .....	147
Figure 4. 21. Roses des vents enregistrés à 21 h par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B) .....	148
Figure 4. 22. Orientation des voies de circulation par rapport à la brise de mer .....	149
Figure 4. 23. Vents en début de l'après-midi (A) et en fin d'après-midi (B) dans le quartier européen à Bizerte (les 20 et 21 août 2021) .....	151
Figure 4. 24. Facteur de vue du ciel dans le quartier européen à Bizerte : Illustration par rapport aux largeurs des rues .....	152
Figure 4. 25. Facteur de vue du ciel dans le quartier européen à Bizerte : Illustration par rapport aux vitesses des brises .....	152

## CHAPITRE 5

Figure 5. 1. Nombre des jours de sirocco et leurs pourcentages (par rapport au nombre total des jours) pour le mois de juin pour la période 1990-2022 .....	157
Figure 5. 2. Nombre des jours de sirocco et leurs pourcentages (par rapport au nombre total des jours) pour le mois de juillet pour la période 1990-2022 .....	160
Figure 5. 3. Nombre des jours de sirocco et leurs pourcentages (par rapport au nombre total des jours) pour le mois d'août pour la période 1990-2022 .....	162
Figure 5. 4. Nombre des jours de sirocco et leurs pourcentages (par rapport au nombre total des jours) pour le mois de septembre pour la période 1990-2022 .....	164
Figure 5. 5. Nombre des jours de sirocco par mois et par année .....	166
Figure 5. 6. Nombre total des jours de sirocco par mois durant la période 1990-2022 .....	169
Figure 5. 7. Cartes du géopotential 500 hPa (A) et du vent à 10 m (B) de la date du 10/08/2021 à 12h UTC .....	170
Figure 5. 8. Une importante tempête de sable quitte l'Afrique du Nord et traverse la Méditerranée pour se diriger vers l'Europe, le 18 juillet 2000 .....	174
Figure 5. 9. Cartes du géopotential 500 hPa (A) et du vent à 10 m (B) de la date du 18/07/2000 à 12h UTC .....	174

Figure 5. 10. Poussière saharienne sur la mer Méditerranée au-dessus de la mer Méditerranée et vers le nord-est jusqu'en Italie .....	175
Figure 5. 11. Cartes du géopotential 500 hPa (A) et du vent à 10 m (B) de la date du 16/07/2003 à 12h UTC .....	175
Figure 5. 12. Cartes du géopotential 500 hPa (A) et du vent à 10 m (B) de la date du 17/08/2021 à 12h UTC .....	176
Figure 5. 13. Coupes longitudinale et transversale montrant le couloir topographique entre la carrière de ciment et le site de Borj Taleb.....	176
Figure 5. 14. Photos de la tempête de sable du 27/08/2023 sur le Grand-Tunis.....	177
Figure 5. 15. Cartes du géopotential 500 hPa et du vent de la date du 27/08/2023 à 14h (heure locale) .....	177

## CHAPITRE 6

Figure 6. 1. Sites de la campagne de mesure réalisée du 11/05/2004 à 07/06/2004 moyennant un laboratoire mobile.....	183
Figure 6. 2. Variabilité quotidienne du SO <sub>2</sub> sur le site de l'usine de SOTULUB à Zarzouna.....	184
Figure 6. 3. Carte des concentrations de dioxyde de soufre dans l'agglomération de Bizerte (Matin).....	186
Figure 6. 4. Carte des concentrations de dioxyde de soufre dans l'agglomération de Bizerte (Après-midi) .....	187
Figure 6. 5. Carte des concentrations de dioxyde de soufre dans l'agglomération de Bizerte (Soir).....	187
Figure 6. 6. Position du site de Borj Taleb par rapport à la colline au nord-ouest, la cimenterie de Bizerte au sud-est et la mer à l'est.....	189
Figure 6. 7. Répartition spatiale des concentrations SO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (matin) .....	190
Figure 6. 8. Répartition spatiale des concentrations SO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (début de l'après-midi) .....	190
Figure 6. 9. Répartition spatiale des concentrations SO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (fin de l'après-midi) .....	190
Figure 6. 10. Répartition spatiale des concentrations SO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (soir) .....	190
Figure 6. 11. Répartition spatiale des concentrations SO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte drapées sur sa maquette 3D .....	191
Figure 6. 12. Répartition quotidienne des concentrations moyennes sur 24 heures du NO <sub>2</sub> au centre-ville de Bizerte .....	192

Figure 6. 13. Répartition hebdomadaire des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> au centre-ville de Bizerte .....	193
Figure 6. 14. Répartition hebdomadaire des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par régime de travail au centre-ville de Bizerte .....	194
Figure 6. 15. Répartition hebdomadaire des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par mois au centre-ville de Bizerte .....	194
Figure 6. 16. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par régime de travail au centre-ville de Bizerte .....	195
Figure 6. 17. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par régime de travail du lundi au vendredi au centre-ville de Bizerte .....	196
Figure 6. 18. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par régime de travail pendant le week-end au centre-ville de Bizerte .....	196
Figure 6. 19. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par jour de travail / congé pendant le mois de juin au centre-ville de Bizerte.....	197
Figure 6. 20. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par jour de travail / congé pendant le mois de juillet au centre-ville de Bizerte.....	197
Figure 6. 21. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par jour de travail / congé pendant le mois d'août au centre-ville de Bizerte .....	198
Figure 6. 22. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO <sub>2</sub> par mois au centre-ville de Bizerte.....	198
Figure 6. 23. Répartition quotidienne des concentrations moyennes sur 24 heures du NO <sub>2</sub> à Zeqaq-Ezzouz et au centre-ville .....	199
Figure 6. 24. Répartition hebdomadaire des concentrations moyennes sur 24 heures du NO <sub>2</sub> à Zeqaq-Ezzouz et au centre-ville .....	200
Figure 6. 25. Carte des concentrations de dioxyde d'azote dans l'agglomération de Bizerte (matin) .....	201
Figure 6. 26. Carte des concentrations de dioxyde d'azote dans l'agglomération de Bizerte (après-midi) .....	202
Figure 6. 27. Carte des concentrations de dioxyde d'azote dans l'agglomération de Bizerte (Soir).....	202
Figure 6. 28. Carte des concentrations de NO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (début de l'après-midi) .....	203
Figure 6. 29. Carte des concentrations de NO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (fin de l'après-midi) .....	203
Figure 6. 30. Répartition des concentrations moyennes sur 24 heures des PM sur une échelle journalière.....	205

Figure 6. 31. Répartition des concentrations des PM durant la période du 01/01/2023 au 29/08/2023.....	205
Figure 6. 32. Répartition des concentrations moyennes sur 24 heures des PM sur une échelle journalière.....	207
Figure 6. 33. Répartition des concentrations moyennes sur 24 heures des PM sur une échelle journalière pendant le mois de juin 2023 .....	207
Figure 6. 34. Répartition des concentrations moyennes sur 24 heures des PM sur une échelle journalière pendant le mois de juillet 2023 .....	208
Figure 6. 35. Situations d'inversions thermiques coïncidant avec des dépassements des concentrations les plus importantes de PM <sub>10</sub> : 22 et 24 juin 2023, du 19 au 25 juillet 2023 .....	209
Figure 6. 36. Carte des concentrations des PM <sub>2,5</sub> à Bizerte (Mesures matinales de 07h30 à 08h00).....	210
Figure 6. 37. Carte des concentrations des PM <sub>2,5</sub> à Bizerte (Mesures en début d'après-midi de 12h30 à 13h00).....	211
Figure 6. 38. Carte des concentrations des PM <sub>2,5</sub> à Bizerte (Mesures en fin d'après-midi de 17h30 à 18h00).....	211
Figure 6. 39. Carte des concentrations des PM <sub>2,5</sub> à Bizerte .....	212
Figure 6. 40. La corniche de Bizerte après les intempéries en novembre 2019.....	213
Figure 6. 41. Partie des travaux de protection et d'aménagement de la corniche de Bizerte.	213
Figure 6. 42. Site de mesure aux environs de l'agence de la banque de l'Habitat.....	214
Figure 6. 43. Carte des concentrations des PM <sub>2,5</sub> dans le quartier européen à Bizerte (Mesures en début d'après-midi de 13h30 à 14h00).....	215
Figure 6. 44. Carte des concentrations des PM <sub>2,5</sub> dans le quartier européen à Bizerte (Mesures en fin d'après-midi de 17h30 à 18h00) .....	216
Figure 6. 45. Pluies convectives du 17/08/2022 à 13h30 heure locale (photo extraite d'une vidéo tournée au centre-ville de Bizerte) .....	217
Figure 6. 46. Carte des concentrations de CO <sub>2</sub> à Bizerte (Mesures en début d'après-midi de 12h30 à 13h00).....	220
Figure 6. 47. Concentrations de CO <sub>2</sub> à Bizerte (Mesures nocturnes de 23h30 à 00h00).....	221
Figure 6. 48. Carte des concentrations de CO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (Mesures matinales de 07h30 à 08h00).....	221
Figure 6. 49. Carte des concentrations de CO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (Mesures en fin d'après-midi de 17h30 à 18h00) .....	222
Figure 6. 50. Carte des concentrations de CO <sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (Mesures nocturnes de 23h30 à 00h00).....	222

## CHAPITRE 7

Figure 7. 1. Régime quotidien d’ozone (pendant toute l’année).....	228
Figure 7. 2. Régime quotidien d’ozone pendant la saison photochimique .....	229
Figure 7. 3. Relation entre la concentration en ozone troposphérique et le dioxyde de soufre à Bizerte (Site de Tunisie Telecom près de la station ANPE) .....	229
Figure 7. 4. Concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 au centre-ville.....	230
Figure 7. 5. Répartition hebdomadaire des concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 au centre-ville .....	230
Figure 7. 6. Répartition quotidienne des concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 au centre-ville .....	231
Figure 7. 7. Répartition hebdomadaire des concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 à Zeqaq-Ezzouz.....	231
Figure 7. 8. Répartition quotidienne des concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 à Zeqaq-Ezzouz .....	232
Figure 7. 9. Concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 à Zeqaq-Ezzouz.....	232
Figure 7. 10. Régime quotidien de l’ozone troposphérique comparé mois par mois durant la saison photochimique .....	233
Figure 7. 11. Directions du vent coïncidant avec les jours d’avril marqués par les plus hautes concentrations en ozone troposphérique .....	234
Figure 7. 12. Directions du vent coïncidant avec les jours d’avril marqués par les plus hautes concentrations en ozone troposphérique .....	235
Figure 7. 13. Répartition mensuelle des concentrations de l’ozone troposphérique.....	236
Figure 7. 14. Variation quotidienne des concentrations maximales de l’ozone troposphérique pendant la saison photochimique.....	237
Figure 7. 15. Variations des concentrations maximales de l’ozone troposphérique pendant la saison photochimique selon la direction du vent.....	238
Figure 7. 16. Fréquence des dépassements de la moyenne mobile sur 8h aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par heure du jour pendant la saison photochimique.....	239
Figure 7. 17. Fréquence des dépassements de la moyenne mobile sur 8h aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par jour de la semaine pendant la saison photochimique ..	240
Figure 7. 18. Fréquence des dépassements de la moyenne mobile aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par mois .....	241
Figure 7. 19. Fréquence des dépassements de la moyenne mobile aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par direction du vent pendant la saison photochimique .....	241

Figure 7. 20. Rose de vent de la fréquence des dépassements de la moyenne mobile aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par direction du vent pendant la saison photochimique .....	242
Figure 7. 21. Répartition quotidienne des concentrations maximales de l’ozone troposphérique pour le 09 avril 2011.....	243
Figure 7. 22. Détails de la répartition journalière des concentrations de l’ozone troposphérique de tout le mois d’avril 2011 .....	243
Figure 7. 23. Détails de la répartition journalière des concentrations de l’ozone troposphérique de la période du 04 au 20 du mois d’avril 2011 .....	244
Figure 7. 24. Maximum des concentrations horaires d’ozone troposphérique (année 2011) par mois et par heure d’enregistrement .....	246
Figure 7. 25. Concentrations moyennes d’ozone troposphérique par direction du vent, période 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020 .....	247
Figure 7. 26. Concentrations moyennes d’ozone troposphérique mesurées pendant la période matinale, période 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020.....	247
Figure 7. 27. Concentrations moyennes d’ozone troposphérique mesurées pendant la période de l’après-midi, période 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020 .....	248
Figure 7. 28. Concentrations moyennes d’ozone troposphérique mesurées pendant la période nocturne, période 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020 .....	249
Figure 7. 29. Répartition des moyennes de l’ozone troposphérique par circuit et par période de la journée .....	249
Figure 7.30. Circuits des mesures semi-itinérantes de l’ozone troposphérique.....	250
Figure 7. 31. Répartition spatiale des concentrations moyennes de l’ozone troposphérique le matin.....	251
Figure 7. 32. Répartition spatiale des concentrations moyennes de l’ozone troposphérique l’après-midi.....	252
Figure 7. 33. Répartition spatiale des concentrations moyennes nocturnes de l’ozone troposphérique .....	253
Figure 7. 34. Répartition quotidienne des concentrations d’ozone troposphérique .....	254
Figure 7. 35. Rose des vents correspondant aux concentrations moyennes d’ozone troposphérique par direction du vent (période du 23/08/2021 au 07/09/2021).....	255
Figure 7. 36. Position relative du site du capteur de l’ozone troposphérique à Zeqaq-Ezzouz par rapport aux hauteurs d’Ennadhour et le couloir topographique .....	255
Figure 7. 37. Carte des concentrations de l’ozone troposphérique dans le quartier européen à Bizerte (Mesures en début d’après-midi de 12h30 à 13h00).....	256

## CHAPITRE 8

Figure 8. 1. Echantillons d'apprentissage et échantillons de validation du modèle avec la régression Ridge pour la période matinale .....	264
Figure 8. 2. Echantillons d'apprentissage et échantillons de validation du modèle avec la régression Ridge pour la période de l'après-midi.....	264
Figure 8. 3. Echantillons d'apprentissage et échantillons de validation du modèle avec la régression Ridge pour la période nocturne .....	265
Figure 8. 4. Croisement des valeurs mesurées et celles simulées de la campagne matinale de mesure des concentrations d'ozone troposphérique .....	266
Figure 8. 5. Croisement des valeurs mesurées et celles simulées avec les données de la campagne de l'après-midi de mesure des concentrations d'ozone troposphérique....	267
Figure 8. 6. Croisement des valeurs mesurées et celles simulées avec les données de la campagne nocturne de mesure des concentrations d'ozone troposphérique .....	268
Figure 8. 7. Importance des variables dans le modèle avec les données de la campagne matinale de mesure des concentrations d'ozone troposphérique .....	270
Figure 8. 8. Importance des variables dans le modèle avec les données de la campagne de l'après-midi de mesure des concentrations d'ozone troposphérique.....	270
Figure 8. 9. Importance des variables (les 10 plus influentes) dans le modèle avec les données de la campagne nocturne de mesure des concentrations d'ozone troposphérique .....	271
Figure 8. 10. Carte des concentrations moyennes matinales de l'ozone troposphérique à Bizerte, cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures.....	272
Figure 8. 11. Carte des résidus de l'application de la régression Ridge avec les moyennes matinales de l'ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures).....	273
Figure 8. 12. Carte des concentrations moyennes de l'après-midi de l'ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures).....	274
Figure 8. 13. Carte des résidus de l'application de la régression Ridge avec les moyennes de l'après-midi de l'ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures .....	275
Figure 8. 14. Carte des concentrations moyennes nocturnes de l'ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures.....	276
Figure 8. 15. Carte des résidus de l'application de la régression Ridge avec les moyennes nocturnes de l'ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures.....	277

# Liste des tableaux

## CHAPITRE 1

Tableau 1. 1. Les différentes échelles de la pollution atmosphérique.....	55
Tableau 1. 2. Grille de calcul de l'indice ATMO provenant de l'arrêté du 21 décembre 2011 modifiant l'arrêté 22 juillet 2004 relatif aux indices de la qualité de l'air .....	61
Tableau 1. 3. Seuils des différents polluants dans les deux références de l'OMS : 2005 et 2021 .....	64
Tableau 1. 4. Récapitulatif des seuils d'information et de recommandation en vigueur en France .....	65
Tableau 1. 5. Principales valeurs de la qualité de l'air dans la réglementation tunisienne .....	66

## CHAPITRE 3

Tableau 3. 1. Décomposition de la variance pour la classification optimale : saison chaude (1990-2022) : (Dissimilarité de « Distance euclidienne », Méthodes d'agrégation « Critère de Ward-MW » et « Lien moyen – LM »).....	106
Tableau 3. 2. Nombre des observations par classe et par mois durant la saison chaude de la période 1990-2022 .....	107
Tableau 3. 3. Min., Moy. et max des paramètres météorologiques par classe pour le mois de juin durant la saison chaude de la période 1990-2022 .....	108
Tableau 3. 4. Min., Moy. et max des paramètres météorologiques par classe pour le mois de juillet durant la saison chaude de la période 1990-2022.....	108
Tableau 3. 5. Min., Moy. et max des paramètres météorologiques par classe pour le mois d'août durant la saison chaude de la période 1990-2022 .....	108
Tableau 3. 6. Min., Moy. et max des paramètres météorologiques par classe pour le mois de septembre durant la saison chaude de la période 1990-2022.....	108
Tableau 3. 7. Séquence de jours successifs où $T_x \geq 40^\circ\text{C}$ pendant le mois de juin .....	109
Tableau 3. 8. Ecart à la normale (+ ou - $5^\circ\text{C}$ ) du mois de juin pour $T_x$ et $T_n$ et par classe...	112
Tableau 3. 9. Séquence de jours successifs où $T_x \geq 40^\circ\text{C}$ pendant le mois de juillet .....	113
Tableau 3. 10. Ecart à la normale (+ ou - $5^\circ\text{C}$ ) du mois de juillet pour $T_x$ et $T_n$ et par classe .....	116

Tableau 3. 11. Séquence de jours successifs où $T_x \geq 40^\circ\text{C}$ pendant le mois d'août .....	119
Tableau 3. 12. Ecart à la normale (+ ou - $5^\circ\text{C}$ ) du mois d'août pour $T_x$ et $T_n$ et par classe..	122
Tableau 3. 13. Séquence de jours successifs où $T_x \geq 40^\circ\text{C}$ pendant le mois de septembre	124
Tableau 3. 14. Ecart à la normale (+ ou - $5^\circ\text{C}$ ) du mois de septembre pour $T_x$ et $T_n$ et par classe .....	126
Tableau 3. 15. Comparaison entre les écarts à la normale (+ ou - $5^\circ\text{C}$ ) des mois de juin à septembre pour $T_x$ et $T_n$ .....	127

## CHAPITRE 5

Tableau 5. 1. Séquences de jours successifs de sirocco pour le mois de juin de la période 1990-2022.....	158
Tableau 5. 2. Fréquence des jours de sirocco de la période 1970-1977 pour quelques villes du nord de la Tunisie.....	159
Tableau 5. 3. Nombre de jours de sirocco par classe pour le mois de juin de la période 1990-2022.....	159
Tableau 5. 4. Séquences de jours successifs de sirocco pour le mois de juillet de la période 1990-2022 .....	160
Tableau 5. 5. Nombre de jours de sirocco par classe pour le mois de juillet de la période 1990-2022.....	161
Tableau 5. 6. Séquences de jours successifs de sirocco pour le mois d'août de la période 1990-2022.....	162
Tableau 5. 7. Nombre de jours de sirocco par classe pour le mois d'août de la période 1990-2022.....	163
Tableau 5. 8. Séquences de jours successifs de sirocco pour le mois de septembre de la période 1990-2022 .....	165
Tableau 5. 9. Comparaison des jours de sirocco par mois de la saison chaude de la période 1990-2022.....	166
Tableau 5. 10. Nombre de jours de sirocco et vitesse du vent par mois de la saison chaude de la période 1990-2022 .....	167
Tableau 5. 11. Comparaison des données météorologiques des deux stations pour la journée du 14/08/2020 .....	168
Tableau 5. 12. Jours des extrêmes de températures enregistrées par jours de sirocco par mois de la période 1990-2022 .....	169

## **CHAPITRE 6**

Tableau 6. 1. Périodes des différentes campagnes de mesures réalisées sur quatre sites, moyennant un laboratoire mobile .....	183
Tableau 6. 2. Effets du CO <sub>2</sub> sur le métabolisme .....	218
Tableau 6. 3. Synthèse des émissions brutes des GES directs en 2012 (eq-CO <sub>2</sub> ).....	219

## **CHAPITRE 8**

Tableau 8. 1. Paramètres et qualité du modèle avec la régression Ridge avec les données de la campagne matinale de mesure des concentrations d’ozone troposphérique.....	266
Tableau 8. 2. Paramètres et qualité du modèle avec la régression Ridge avec les données de la campagne de l’après-midi de mesure des concentrations d’ozone troposphérique .....	267
Tableau 8. 3. Paramètres et qualité du modèle avec la régression Ridge avec les données de la campagne nocturne de mesure des concentrations d’ozone troposphérique.....	268

## Liste des acronymes

Abréviation	Signification
%	Pourcentage
°C	Degré Celsius
µg/m <sup>3</sup>	Microgramme par mètre cube
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
3MI	Multi-viewing Multi-channel Multi-polarisation Imager
5P	Sentinel-5 Precursor (Mission du satellite Sentinel)
ACP	Analyse en Composantes Principales
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AEMET	Agence Météorologique Nationale Espagnole
AFNOR	Association Française de NORmalisation
Air PACA	AtmoSud Provence Alpes Côte d'Azur (AtmoSud), Association (nouveau nom d'Air Paca)
AIRPARIF	Association Interdépartementale pour la gestion du Réseau automatique de surveillance de la Pollution Atmosphérique et d'Alerte en Région d'Île-de-France
AM	After Midnight (en anglais)
ANPE	Agence Nationale de Protection de l'Environnement
AQS	Air Quality System
ASTER-TIR	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer- Thermal Infrared
ATMO	Indice de qualité de l'air
AVITEM	Agence des Villes et Territoires Méditerranéens
BRI	Browning Reflectance Index
BrO	Monoxyde de brome
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CEE-ONU	Commission économique pour l'Europe des Nations unies
CERES	Clouds and Earth's Radiant Energy System
CFC	Chlorofluorocarbures
CFS	Climate Forecast System
CH <sub>4</sub>	Méthane
CI	Concentration inhalée
Circ	Centre international de recherche sur le cancer
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CITET	Centre International des Technologies de l'Environnement de Tunis
CMRT	Conflict Minerals Reporting Template
CO	Monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
COV	Composés organiques volatils
COV-NM	Composés organiques volatils non méthaniques
CRDA	Commissariat Régional au Développement Agricole
Cref	Concentration journalière tolérable (au sens concentration de référence)
CV	Coefficient de variation
DDL	Degré de liberté
DE	Distance euclidienne
DEA	Diplôme d'études approfondies
DEWP_C	Dew point temperature (Température de rosée)
DGEQV	Direction Générale de l'Environnement et de la Qualité de la Vie
DGPC	Direction Générale des Ponts et Chaussées
DMM	Deuxième moitié du mois
E	Est (Direction)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EMEP/CORINAIR	Inventaire des émissions de polluants atmosphériques (Nouveau nom : EMEP/EEA)
ENS	École normale supérieure
eq	équivalent
ERA5	Cinquième génération de réanalyse ECMWF pour le climat et la météo mondiale au cours des 8 dernières décennies
ESA	European Space Agency
ESE	Est Sud-Est (Direction)
fig.	Figure
FNORS	Fédération nationale des observatoires régionaux de la santé
FR	France
FVC	Facteur de vue du ciel
GEDyS	Géographie Environnement et Dynamiques Spatiales
GEOS5	Goddard Earth Observing System Model, Version 5
GES	Gaz à effet de serre
GFS	Global Forecast System (modèle de prévision numérique du temps du National Weather Service des États-Unis)
Gg	Gigagrammes (1 Gg = 10 <sup>9</sup> g)
GREC-PACA	Groupe régional d'experts sur le climat en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-SUD)
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCHO	formaldéhyde
hPa	Hectopascal
IASI-NG	Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge de nouvelle génération
ICR	Ilot de chaleur régional

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
ICU	Ilot de chaleur urbain
IEVP CT MED	Instrument Européen de Voisinage et de partenariat, Coopération Transfrontalière, Programme de Bassin Maritime Méditerranée
IFDD	Institut de la Francophonie pour le Développement Durable
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INM	Institut National de la Météorologie
INS	Institut National de la Statistique
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (En français : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
IR	Indice de risque
JORT	Journal Officiel de la République Tunisienne
LAURE	Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie
LIDAR	Light Detection And Ranging
LM	Lien moyen
LPED	Laboratoire Population Environnement Développement
m/s	Mètre par seconde
MAERH	Ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques
MAXC	Température maximale
MALE	Ministère des Affaires Locales et l'Environnement
MedECC	Mediterranean Experts on Climate and environmental Change
MERRA2	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2
METAR	Meteorological Aerodrome Report
METImage	Imageur Infrarouge Visible
Mg/m <sup>3</sup>	Microgramme par mètre cube
min_rh	Humidité relative minimale
MINC	Température minimale
MNDWI	Modified Normalised Difference Water Index
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MW	Méthode de Ward
N	Nord
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Nbre	Nombre
NDBI	Normalized Difference Built-up Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalised Difference Water Index
NE	Nord-Est
NEC	National Emissions Ceilings
NNE	Nord Nord-Est
NNO	Nord Nord-Ouest

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
NO	Nord-Ouest
NO <sub>2</sub>	Dioxyde d'azote
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote
O	Oxygène
O <sub>3</sub>	Ozone
OCHCHO	Glyoxal
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLI-TIRS	Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor
OMER7-A	Outils numériques pédagogiques pour les sciences de l'environnement terrestre - Atmosphère
OMER7-SEDOO	SErvice de DONnées de l'Observatoire Midi-Pyrénées
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONO	Ouest Nord-Ouest
OSO	Ouest Sud-Ouest
PGES	Plan de Gestion Environnementale et Sociale
PLS	Partial least square
PM	Particulate Matter
PMM	Première moitié du mois
POWER	Prediction Of Worldwide Energy Resources
Ppb	Part Per Billion
ppbv	Part Per Billion (en volume)
Ppm	Partie Par Million
ppmv	Partie Par Million (en volume)
pptv	Partie Par Trillion (en volume)
PRCP	Précipitations (en mm)
PS	Particules en Suspension
QGIS	Quantum GIS
R <sup>2</sup>	Coefficient de détermination
RADAR	Radio detection and ranging
RMSE	Root-mean-square error
RNSQA	Réseau national de surveillance de la qualité de l'air
S	Sud
SACEM	Société de Construction Mécanique (Fabricant de transformateurs électriques en Tunisie)
SCB	Société les Ciments de Bizerte
SE	Sud-Est
SLP	Sea Level Pressure (Pression atmosphérique au niveau de la mer)
SO	Sud-Ouest

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
SO <sub>2</sub>	Dioxyde de soufre
SODAR	Sonic Detection And Ranging
SOTULUB	Société Tunisienne de Lubrifiants
SO <sub>x</sub>	Oxydes de soufre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSE	Sud Sud-Est
SSO	Sud Sud-Ouest
STIR	Société Tunisienne des Industries de Raffinage
SVF	Sky view factor
SYFACTE	Système d'Informations Formations, Aménagement, Cartographie, Télédétection et Environnement
tab.	Tableau
TEMP_C	Température en °C
TMNMY	Température minimale moyenne
TMXMY	Température maximale moyenne
Tn	Température minimale
TROPOMI	TROPOspheric Monitoring Instrument
TSP	Total Suspended Particulates
Tx	Température maximale
Ty	Température moyenne
UE	Union européenne
UHI	Urban Heat Island
UMR	Unité mixte de recherche
PRODIG	Pôle de Recherche pour l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNRIC	United Nations Regional Information Center of Occidental Europe (Centre d'Information Régional des Nations Unies pour l'Europe Occidentale)
USEPA	United States Environmental Protection Agency
USGS	United States Geological Survey
UTC	Coordinated Universal Time
UV	Ultraviolet
UVED	Université Virtuelle Environnement et Développement durable
VISIB	Visibilité
VLC	Valeur limite de concentration
WDSP	Wind speed
WE	Week-end
WGS	World Geodetic System
WHO	World Health Organization
WND	Wind direction

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
WSF	World Settlement Footprint
WWF	World Wildlife Fund
Δ	Delta

# INTRODUCTION GENERALE

Beltrando *et al.* (1995), définissent le type de temps par « *la manifestation d'un type de situation atmosphérique sur les paramètres du climat. L'état de l'atmosphère est précisé à l'aide de paramètres climatiques (température de l'air, hygrométrie, précipitations...), tandis que la situation météorologique est caractérisée par l'emplacement des centres d'action, le type de masse d'air en présence, les flux, l'existence ou la survenue de perturbations* ». L'intérêt de l'étude des types de temps, notamment pendant la saison chaude, trouve un appui dans l'influence et l'impact des conditions météorologiques et des différentes circulations atmosphériques sur l'homme, la végétation et la pollution atmosphérique, particulièrement celle photochimique, surtout dans un contexte de réchauffement climatique. Dans de telles études, il faut considérer « qu'un type de temps est influencé, en plus de la configuration synoptique, par les facteurs géographiques » (Mounier, 1977). Il faut considérer aussi qu'en ville la densité et le volume des surfaces bâties, l'orientation et l'encaissement des rues sont les principaux facteurs qui expliquent la répartition spatiale des variables météorologiques, mais aussi de la pollution atmosphérique. C'est pourquoi l'urbanisation est un des quatre défis identifiés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) en particulier dans le cadre du World Weather Research Programme (WWRP) (Masson, 2021).

Au niveau mondial, même si les villes ne représentent que 2% de la surface de la Terre, la demande énergétique est responsable de 60 % des émissions des gaz à effet de serre (GES). Une situation encore aggravée par la diminution des espaces verts (Nations Unies, web). Dans les pays bordant la Méditerranée, la forte variabilité spatiale et temporelle des températures et des précipitations peut engendrer des sécheresses et des canicules en été, des orages violents et des pluies intenses (la tempête Daniel déclenchée le 4 septembre 2023 en Méditerranée a touché successivement la Grèce, la Turquie, la Bulgarie et la Libye, causant plusieurs milliers de morts) (UNRIC, web, 2023). Ces extrêmes et évolutions du climat provoqueraient des impacts sur la ressource en eau, le confort thermique, et par conséquent, sur la demande énergétique ainsi que sur la santé des populations, dans un contexte d'habitats souvent précaires (MC3, web, 2020).

Aussi, dans les pays à climat chaud comme en Tunisie en été, les conditions météorologiques ont un grand impact sur l'homme, la végétation et la pollution atmosphérique ce qui explique l'intérêt porté à l'étude des types de temps. Ces types de temps sont les résultats de types de circulation plus générales ou se situant en amont. Plus l'on grandit l'espace étudié et plus on se rapproche du type de circulation (Martin, 2007). Martin et Adnès (2015) ont identifié les

contextes synoptiques responsables de différents niveaux de pollution particulières. En effet, selon les auteurs, les jours marqués par une forte pollution particulaire sont caractérisés, en altitude, par une circulation plus méridionale avec le développement d'une dorsale anticyclonique sur l'Europe de l'ouest.

D'un autre côté, l'évaluation de la qualité de l'air doit se faire dans une démarche multiscalaire car la manifestation de situations anticycloniques en altitude (500 hPa) est nécessaire pour toute « épisode photochimique » (Martin, 2007). Il faut aussi que, localement, le temps réunisse les facteurs favorables (Martin, 2007). Dans cette vision et conscients de leurs impacts environnemental, sanitaire voire socio-économique, les géographes-climatologues s'intéressent de plus en plus à l'étude des brises. De par leur rôle dans l'acheminement des polluants et la perception du confort thermique, ces dernières influencent à différents degrés et à différentes échelles le bien-être humain et le comportement socio-économique des habitants des zones se trouvant sous l'effet de ces brises (Beltrando *et al.*, 2008). La brise est un vent alternant journalier généré par le contraste thermique entre deux surfaces limitrophes et qui se traduit par un « *gradient de pression et par conséquent par un changement de la direction et de la vitesse du vent* » (Carrega, 1994 ; Beltrando *et al.*, 2008). Les conditions favorables au développement de la brise de mer sont surtout liées à un réchauffement diurne rapide du continent plus important que celui de la mer. La nuit, le phénomène inverse est observé. Le refroidissement de la terre, plus important que celui de la mer, donne naissance, dans les basses couches de l'atmosphère, à un vent dirigé de la terre vers la mer, il s'agit de la brise de terre (Simpson, 1994).

L'observation et la description des brises ont fait l'objet d'un nombre important d'études et de publications, que ce soit pour les brises littorales (Carrega, 1989, 1994 ; Dahech, 2007, You C. *et al.*, 2019), orographiques (Quénol, 2002 ; Madelin, 2004, Wu S. *et al.*, 2021, Zeinaldine et Dahech, 2023...) ou urbaines (Oke, 1993 ; Carrega, 1994, Cheng *et al.*, 2023). Soutenu par le progrès des moyens technologiques et instrumentales (mini-capteurs, stations météorologiques automatiques, images satellitaires), les données sur la brise sont devenues plus faciles à collecter permettant ainsi une meilleure appréciation et compréhension du phénomène. Les brises nécessitent souvent une étude multiscalaire car elles influencent divers domaines en interaction entre le milieu physique et la société (Diffusion ou concentration de pollution industrielle ou urbaine, circulation et rafraîchissement de l'air public, ...). Dans leurs travaux, Orlandski (1975), Yoshino (1975), Carrega (1989) et Quénol (2002) ont montré la nécessité de la hiérarchisation des échelles pour l'étude des phénomènes atmosphériques allant du

synoptique (plusieurs centaines de kilomètres), au régionale (100 km - 10 km), jusqu'à celle locale (10 km - 1 km), voire microlocale (100 m - 1 m). La brise thermique est plutôt à étudier dans les deux dernières échelles.

Contrairement à la brise de mer, le sirocco est un vent d'origine tropicale continentale qui souffle sur la Méditerranée (échelle régionale). Dans certaines régions de l'Italie, le terme sirocco est parfois utilisé pour des vents chauds de type föehn et qui ne sont pas d'origine tropicale continentale (Henia, 1980). L'appellation de ce vent diffère d'un pays à l'autre. Il est appelé « Chili ou Chehili » en Afrique du Nord, « Guibli » en Libye, « Khamsin » en Egypte, « Levèche » au Sud-Est de l'Espagne et « Marin » dans le golfe du Lion (Henia, 1980). En été, ce type de vent est pénible à supporter par l'homme, les animaux et les plantes en raison de la forte chaleur et de la sécheresse qu'il apporte. Des canicules peuvent l'accompagner avec ou sans sable. Il peut être à l'origine de difficultés respiratoires chez les gens sensibles. Aussi, de par sa vitesse, faible à modérée, le sirocco est favorable aux fortes concentrations de polluants atmosphériques en milieu urbain, notamment s'il est fortement industrialisé comme l'agglomération de Bizerte. Il peut être à l'origine d'incendies de forêt (Belhadj Khedher *et al.*, 2020). Le sirocco n'est pas un phénomène météorologique qui ne concerne que le pays de la rive sud de la Méditerranée, mais il peut aussi toucher ceux de la rive nord. En effet, sous des conditions de circulation atmosphériques bien définies, le sirocco peut atteindre certains pays de l'Europe. Le mardi 20 juin 2023 et pour la première fois cette année, le seuil des 40 °C a été franchi en France. En Sartène, en Corse-du-Sud, ce record n'a pas été enregistré depuis la canicule de 2019 (Patrick Marlière météorologue chez Agate Météo, web). Cette situation résulte d'une dépression qui s'est formée sur la partie ouest de la Méditerranée tandis qu'un anticyclone était présent sur la partie nord de l'Italie (Ouest France, web, publié le 21/06/2023 à 11h07). De son côté, l'Agence Météorologique Nationale Espagnole (AEMET) reporte que, sous l'effet du sirocco accompagné par une tempête de sable, des pistes de ski sont ensablées et des montagnes sont devenues brunes de poussière. Un événement arrivé en mars 202.

En Tunisie, les études consacrées au sirocco datent de l'année 1980 (Henia, 1980). Dans cet article sont évoqués des cas de sirocco en hiver, d'autres en été. Dahech en 2007 a analysé les caractéristiques météorologiques du sirocco et ses impacts sur l'agriculture et la qualité de l'air. Belhadj Khedher, en 2020, a analysé la relation entre le sirocco et les incendies des forêts en Tunisie. Le 27 août 1977, les maximas thermiques enregistrés montrent qu'elles ont atteint 42,6 °C à Bizerte, 39 °C à Gafsa (au sud-ouest de la Tunisie) et 44,6°C Jendouba (au nord-ouest de la Tunisie). Une dissymétrie thermique entre le Nord et le Sud que Henia a lié au fait que le

sirocco subit l'effet de foehn en descendant les versants montagneux de la Dorsale et les plateaux du Haut-Tell, donc il se comprime et il se réchauffe.

De par sa position et l'altitude de la station météorologique sises à l'aérodrome de Sidi Ahmed, l'épaisseur du sirocco à Bizerte est approximativement de 500 m (60 % des cas, avec 33 % des cas où le sirocco présente une épaisseur de 500 à 1000 m et 7 % des cas entre 1000 et 1500 m) (Henia, 1980). Dans cette agglomération, les temps associés à la brise littorale et le sirocco sont responsables de la détérioration de la qualité de l'air. Cette pollution de l'air dépend également des sources d'émission.

En effet, une grande partie des émissions de polluants dans les villes est due au trafic routier (OMS, 2014). En Ile-de-France par exemple, le transport routier est responsable de 56 % des émissions de NOx (oxydes d'azote) et de 35 % des émissions de PM<sub>2,5</sub> (particules fines dont la taille est inférieure à 2,5 microns) (Airparif, 2016). Un impact sanitaire certain est attribué au transport routier, notamment en milieu urbain (Khreis *et al.*, 2016). Le chauffage des logements essentiellement dans le secteur résidentiel est aussi une source considérable de pollution (Airparif, 2016).

Dans le but d'introduire toute étude de la relation entre la pollution de l'air et les conditions météorologiques, il convient de rappeler quelques notions sur la pollution atmosphérique et quelques points historique de son évolution.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit sur son site la pollution atmosphérique comme « *la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par tout agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère.* » (OMS, web).

L'exposition de l'être humain aux polluants atmosphériques à différentes échelles spatiotemporelles est dictée par plusieurs paramètres incluant la météorologie, la topographie, l'occupation du sol, le comportement socio-économique et culturel, ainsi que l'aménagement et l'équipement du territoire (y compris la disposition et l'architecture urbaine). Les impacts des polluants, parfois très nets, sont à l'origine d'une prise de conscience de la nécessité d'agir pour améliorer la qualité de l'air. A la base de ces actions, la surveillance et la caractérisation de la qualité de l'air et ce à travers : 1) des mesures continues au niveau des stations fixes ; 2) des mesures à l'aide des laboratoires mobiles ; 3) des calculs et simulations par le biais de modèles numériques (Mathe, 2010).

Dès lors, de nombreux efforts ont été consentis pour surveiller et diminuer les émissions des polluants d'origine industrielle, agricole ou résultante du transport et cela a donné ses fruits d'une façon très remarquable. Après une période (première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle) pendant laquelle les concentrations de dioxyde de soufre et monoxyde de carbone dans l'atmosphère étaient très alarmantes, elles sont réduites de près d'un tiers sur les deux dernières décennies. À titre d'exemple, les émissions de dioxyde de soufre en France sont passées de 1326 Gg (Gigagrammes) en 1990 à 303 Gg en 2009<sup>1</sup>. Sur la même période, les concentrations de monoxyde de carbone, quant à elles, ont été divisée par trois (de 10890 Gg à 3950 Gg). La situation n'était pas la même pour tous les polluants, car les concentrations des oxydes d'azote et de l'ozone ont atteints et dépassé les seuils d'alerte environnementaux dans les grandes villes. Percy (2004) précise qu'au début du siècle « *L'ozone, qui avait des niveaux moyens de fond compris entre 10 et 15 ppb ....., atteint maintenant 30 à 40 ppb, en de nombreux endroits dans le monde* » (Percy *et al.*, 2004). Cette prise de conscience a franchi une autre étape : des organismes nationaux et internationaux dédiés à la mesure en continu des différents types de pollution ont été créés en vue de trouver une approche et des moyens pour faire face à ces problématiques environnementales. Leur but étant de vérifier les niveaux par rapport aux normes de qualité environnementale implorées. Pour se faire, des réseaux de mesure, dont les données s'appuient sur des analyseurs industriels sont placés dans des stations fixes réparties judicieusement sur le territoire à surveiller. Ces stations de mesures ont permis un suivi continu et précis des teneurs des polluants réglementés sur des lieux stratégiques. En revanche, elles sont peu utiles lorsqu'il s'agit des études qualificatives de l'atmosphère nécessitant une mobilité géographique (Tsujita *et al.*, 2005).

Dans les pays du bassin méditerranéen, plusieurs modèles de gouvernance de la question de la qualité de l'air sont présents. A titre d'exemple, on peut citer :

- Le modèle français de gouvernance est inscrit dans la loi de 1996. Il est basé sur des structures d'expertise associant la société civile, des autorités locales en charge d'appliquer les directives européennes et où l'état joue le rôle d'un coordinateur central
- Le modèle espagnol de gouvernance : basé sur l'appui de la recherche et le rôle des régions autonomes et où l'état garde un rôle central de coordination. Selon un décret de 2011, l'Etat, les régions mais aussi les agglomérations de plus de 100.000 habitants sont soumis à l'obligation de réaliser des plans d'amélioration de la qualité de l'air. Dans le

---

<sup>1</sup> Données du Centre on Emission Inventories and Projection (<http://www.ceip.at> <http://www.ceip.at/emission-data-webdab/officially-reported-emission-data/> )

cas de dépassement des seuils de pollution, la région comme l'agglomération sont habilitées à prendre des mesures d'urgence auprès de leurs administrés

- Le modèle intégré en Jordanie : expertise et régulation réunies en une même structure. La loi sur l'air de 2005 confie au Ministère de l'Environnement les compétences de définir les seuils de pollution admissibles (basés sur les études et recommandations de la Royal Scientific Society).
- Le modèle décentralise du Liban : expertise et décision à l'échelle locale (municipalité) préalables à l'établissement de règles clairement définies au niveau national (où pas moins de cinq ministères se partagent des responsabilités relatives à la qualité de l'air). Le processus de gouvernance de la qualité de l'air suit au Liban une approche bottom-up. (IEVP CT MED-UE, 2016).

Sur le plan académique, diverses études, articles et thèses se sont intéressées aux effets néfastes de la pollution atmosphérique ressentis dans tous les niveaux. Certaines études ont adopté une vision d'analyse de la relation climat-pollution. D'autres ont abordé cette question dans un contexte d'application spécifique. Martin (2008) a analysé la relation entre la pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen en prenant les Alpes Maritimes, comme exemple. Duché (2013) a abordé cette question dans son impact sur les sites touristiques de la région parisienne en analysant à la fois l'exposition et la perception. De son côté, Arroyo (2019) a étudié l'impact de la pollution de l'air sur les poids des nouveaux nés à l'échelle nationale en Espagne. Adoptant une approche comparative avec d'autres villes du bassin méditerranéen, Panopoulou (2019) a analysé la répartition des sources de COV. Il a aussi inventorié leurs sources d'émission dans la grande Athènes.

En Tunisie, le dossier de la pollution atmosphérique a pris une place importante et ce sur différents niveaux. Au niveau décisionnel par l'adoption des textes réglementaires régissant la gestion des seuils et des niveaux de pollution, ainsi que la création de l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement (ANPE) par la loi 88-91 du 2 août 1988 avant même la création du Ministère de l'Environnement. L'ANPE a pour mission principale de concevoir et d'arrêter les lignes directrices de la politique tunisienne dans le domaine de lutte contre la pollution et de protection de l'environnement. Aussi, elle est chargée de veiller à son exécution avec une approche multiscalaire dans le cadre du plan national de développement et ce à travers des actions spécifiques et sectorielles, mais aussi avec des actions plus globales.

Au niveau académique, les études traitant la pollution atmosphérique et les domaines connexes se sont multipliées. Sfax (au centre-est de la Tunisie) et Tunis (au nord-est) ont attiré

plus d'attention à ce propos du fait qu'elles sont les deux plus grandes villes du pays et qu'elles sont très exposées à la pollution de l'air. Slama (1998) a adopté une démarche globale d'analyse de l'influence des paramètres climatiques sur la pollution de l'air dans l'agglomération de Tunis. De son côté, Hachicha-Gasmi (2019) a étudié la dynamique des brises littorales dans le Grand-Tunis et a analysé leurs impacts sur la qualité de l'air. En 2017, Ben Romdhane a traité la question de son intérêt pathologique. Elle a étudié l'impact du climat et de la qualité de l'air sur la santé respiratoire à Tunis.

A Sfax, c'est en 1999 que Belguith a avancé des détails sur les caractéristiques physico-chimiques des aérosols atmosphériques en milieu urbain côtier et ce dans une vision multiscalaire en analysant le degré d'influence des conditions météorologiques en surface et en altitude (500 hPa). Azri (2000) a évoqué la question de la pollution atmosphérique dans la région de Sfax à travers la contribution des sources mobiles et fixes. Plus spécifique, la thèse de Dahech (2007) s'est intéressée à l'étude du vent à Sfax et de son impact sur le climat et la pollution atmosphérique.

Ces auteurs ont également publié d'autres travaux de recherches en plus de ces thèses et masters. Ces travaux seront cités dans cette thèse dans les chapitres concernés. D'autres études, intéressantes existent également, sur le climat et la pollution et sont publiées dans les revues scientifiques. Il s'agit notamment des travaux de Dahech et El Melki qui ont analysé la relation entre la pollution de l'air et le climat.

El Melki (2007) s'est intéressé au Grand-Tunis en analysant la relation entre les inversions thermiques et les concentrations de polluants atmosphériques dans la basse troposphère de Tunis. Il a aussi étudié, en 2008, les conditions atmosphériques ambiantes et la variation spatiotemporelle de la pollution atmosphérique. Dahech (2011) a traité les aspects relatifs aux inégalités spatiales de la qualité de l'air dans l'agglomération de Sfax et ses environs. Avec une démarche plus spécifique, il a analysé en 2018 les aspects topoclimatiques de Bizerte (nord-est de la Tunisie) en étudiant l'îlot de chaleur urbain de la ville et les brises thermiques.

Face à une dégradation alarmante de la qualité de l'air, des régions de la Tunisie ont fait l'objet de projet de coopération ou de vision stratégique. Il s'agit de l'instauration d'une stratégie pour la ville de Sfax à l'horizon de 2030 coordonnée en 2016 par Friedrich Ebert Stiftung, une fondation politique d'Allemagne. En adoptant une démarche globale, mais opérationnelle, cette vision stratégique a essayé d'arrêter un plan d'action comportant des projets stratégiques de développement à court (2016- 2020), moyen (2021-2025) et long (2026-2030) termes et en prenant en considération des contraintes et menaces pesant sur

l'environnement du gouvernorat de Sfax, y compris la pollution atmosphérique.

Sous l'égide du Gouvernement Tunisien et avec un financement de l'Union Européenne (UE, 2017), la ville de Gabes (sud-est de la Tunisie) a bénéficié d'une étude d'impact de la pollution industrielle sur l'économie de la région. Cette étude a contribué à la caractérisation de la pollution générée par les activités industrielles et leurs impacts sur le milieu physique, la santé humaine et sur certaines activités économiques principales de la région.

A Bizerte, les études qui ont été conduites ne sont pas de caractères académiques. C'est l'Etat qui était leur maître-d'ouvrage. Il s'agit notamment de « l'Etude relative à l'amélioration de la qualité de l'air dans la région de Bizerte » conduite par le Ministère des Affaires Locales et l'Environnement) / Direction Générale de l'Environnement et de la Qualité de la Vie en 2006. On trouve aussi des projets de traitement de la pollution atmosphérique comme celui conduit dans le cadre du programme « EcoPact Bizerte » financé par l'Union Européenne et d'une durée de 3 ans.

Le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC) a conclu en 2013 que les villes du bassin méditerranéen représentent une des régions les plus touchées par les impacts des changements climatiques. Elles sont aussi sous l'influence de conditions climatiques similaires impactant la formation et la concentration de certains polluants. Les émissions des polluants dans l'atmosphère proviennent d'une variété d'activités anthropiques (transport, industrie, combustion de biomasse, ...), mais également de sources naturelles (poussières terrestres en suspension, feux de forêt, ...) (Inventaire des émissions de polluants atmosphériques (Nouveau nom : EMEP/EEA), 2005). Chaque année, un million de décès environ sont attribués à la pollution de l'air intérieur et extérieur dans les régions européennes et de l'est de la Méditerranée (MedECC, 2020).

Sur la rive sud de la Méditerranée, au nord-est de la Tunisie, l'agglomération de Bizerte se caractérise par un climat de type méditerranéen doux et ensoleillé. Il fait chaud et sec durant la saison estivale qui dure cinq mois de mai à septembre, tandis qu'il fait assez tempéré durant la saison humide qui dure sept mois d'octobre à avril. Les brises thermiques et le sirocco sont les vents les plus fréquents à Bizerte en été. Leurs influences, avec les vents de sable à un degré moindre, apparaissent dans différents domaines d'application : la santé humaine, la qualité des produits agricoles, les incendies de forêts, mais aussi la répartition de la pollution atmosphérique.

L'agglomération de Bizerte se distingue aussi par une activité industrielle relativement

diversifiée se trouvant à proximité immédiate des zones résidentielles ou zones à activités tertiaires. Cette activité industrielle constitue l'une des principales causes de la dégradation de l'environnement avec toutes ses composantes dans l'agglomération de Bizerte et en particulier dans les banlieues immédiates de la ville de Bizerte et le bassin versant du lac de Bizerte.

L'environnement industriel, le trafic routier, le comportement et habitudes socio-économiques) couplés avec les conditions climatiques et topographiques qui caractérisent l'agglomération de Bizerte (comme dans la plupart des pôles industriels en Tunisie) ont contribué largement à des transformations, parfois majeurs, dans la qualité de son air. Ces transformations sont ressenties à plusieurs niveaux, notamment au niveau de la santé humaine.

C'est dans ce contexte que se situe le thème de recherche « Temps et pollution atmosphérique à Bizerte : Analyse multiscalaire ». Pour mener cette étude, on a essayé de valoriser différents concepts et outils en relation avec l'analyse des relations entre les types de temps estivaux et la pollution atmosphérique.

Cette étude a essayé de traiter cette problématique sous différentes échelles spatio-temporelles pour mettre en exergue les éléments saillants de cette relation.

Les centres de documentation et les bibliothèques des différents organismes ont été visités et contactés (ANPE, Centre International des Technologies de l'Environnement de Tunis - CITET, Direction Générale des Ponts et Chaussées - DGPC, Municipalité de Bizerte). Les documents exploités ont touché aux aspects de la climatologie, chimie de l'atmosphère, de la qualité de l'air, de la télédétection (manuels et imagerie satellite), des systèmes d'information géographique et de la statistique. Aussi, des entretiens avec des responsables et spécialistes du dossier « Pollution atmosphérique » ont été fructueuses puisqu'ils nous ont permis de mieux comprendre la relation temps-pollution atmosphérique. Elles nous ont permis également de voir clair des pistes de réflexion sur cette relation.

La collecte des données et le contrôle de leur qualité sont aussi une étape importante, qui décide de la qualité du travail en lui-même. Dans cette étude, on s'est intéressé aux données de la station fixe de mesure de la concentration d'ozone troposphérique à Bizerte et ce durant la période 2010-2015, à de différentes campagnes de mesures semi-itinérantes notamment dans la période estivale de l'ozone troposphérique ( $O_3$ ), des particules  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$ , du dioxyde d'azote ( $NO_2$ ), du dioxyde de soufre ( $SO_2$ ) et du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Outre les données sur la pollution atmosphérique, nous intégrons celles concernant la météorologie (Données INM-METAR et données de la station automatique DAVIS installée au centre-ville de Bizerte (Commissariat Régional de Développement Agricole de Bizerte, CRDA) du 07 août au 21

septembre 2020. Elle mesure la température, l'humidité relative, la température du point de rosée, la vitesse et la direction du vent et la pression atmosphérique avec un pas de temps demi-horaire.

La valorisation des outils d'analyse, de traitement et de présentation de l'information sont aussi exploités et ce en vue d'une valorisation maximale des données et des résultats. Les systèmes des bases de données, de cartographie numérique et de la télédétection en sont des exemples.

Ce travail de thèse vise à apporter des éléments de réponses à un certain nombre de questions:

- Quelles sont les caractéristiques météorologiques et climatiques de Bizerte pendant la saison chaude (de juin à septembre) de la période 1990-2022 ?
- A quel degré les spécificités géographiques, météorologiques et climatiques de l'agglomération de Bizerte ont-elles influencé la répartition spatiotemporelle et multiscalaire de la pollution atmosphérique ?
- Bizerte est-elle vraiment une ville polluée ? A quel degré ?
- La cartographie classique (ponctuelle) est-elle un moyen suffisant pour représenter la situation de la pollution atmosphérique dans l'agglomération de Bizerte ?
- Pour contourner les lacunes de données sur la situation de la pollution atmosphérique, serait-il possible de tenter la modélisation ? Avec quels moyens ? Sera-elle satisfaisante ?

Pour répondre à ces questions, le manuscrit de cette thèse est organisé en huit chapitres comme suit :

- 1) Un premier chapitre dans lequel on va présenter le cadre conceptuel de l'étude. Aussi, nous allons mettre l'accent sur quelques notions de base nécessaires à la compréhension des thèmes étudiés.
- 2) Un deuxième chapitre est consacré à la description de la zone d'étude et de ses caractéristiques géographiques et socio-économiques. Nous présentons aussi les différentes données exploitées dans ce travail, ainsi que les traitements appliqués.
- 3) Une étude temporelle multiscalaire des types de temps estivaux sera présentée dans un troisième chapitre dans une échelle globale (de toute la saison chaude de 1990-2022), puis à une échelle plus fine (par mois) afin de déceler les spécificités de chacun d'entre eux.

- 4) Un quatrième chapitre dans lequel on va présenter les résultats de l'étude multiscalair de l'aérodologie à Bizerte dans le but d'identifier les paramètres et facteurs qui influencent les caractéristiques des brises thermiques à Bizerte.
- 5) L'analyse statistique du sirocco et les caractéristiques des types de temps associés dans l'agglomération de Bizerte seront décrites dans cinquième chapitre. Dans ce même chapitre nous allons présenter aussi quelques caractéristiques des tempêtes de sable (échelle plus régionale) touchant la zone d'étude.

L'analyse de la pollution atmosphérique est répartie en trois chapitres.

- 6) Un sixième chapitre dans lequel nous allons analyser et cartographier la variabilité spatio-temporelle de quelques polluants à Bizerte afin de pouvoir comprendre cette répartition à plusieurs échelles (agglomération, quartier). Ce chapitre vise aussi à cerner la part des éléments naturelles et de l'action anthropique dans la définition des niveaux de concentration des différents polluants étudiés (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, les PM et CO<sub>2</sub>).
- 7) Un autre chapitre sera consacré à l'analyse et la cartographie de la variabilité spatio-temporelle de l'ozone troposphérique en tant que polluant photochimique.
- 8) Puis un dernier chapitre dans lequel on va présenter un essai de modélisation qui sera appliqué avec les données de l'ozone troposphérique basée sur les données de la campagne de mesures semi-itinérantes réalisées pendant l'été 2020.

# **PARTIE 1**

## **CADRE DE L'ETUDE**

# **CHAPITRE 1**

## **CADRE CONCEPTUEL**

En guise de cadrage conceptuel, nous allons mettre l'accent sur quelques notions de base nécessaires à la compréhension des thèmes étudiés dans ce travail : les types de temps, les brises thermiques, le sirocco et la pollution atmosphérique. Ensuite, nous présentons, la topographie, le climat, l'occupation du sol et quelques caractéristiques démographiques de l'agglomération de Bizerte.

## **1- Notions théoriques liées aux aspects climatiques de l'étude**

### **1.1- Notions théoriques autour des types de temps**

En 1973, la réunion de la commission de climatologie du Comité National Français de Géographie (CNFG) qui s'est tenue à Grenoble s'est focalisée sur la question des « types de temps ». Des critiques ont été formulées face au fait de mêler dans ce concept les éléments descriptifs (le vécu, le mesuré...) et les facteurs explicatifs (la situation synoptique, la circulation...). La majorité des participants ont vu plus qu'il serait plus pertinent de dissocier les deux aspects.

Les débats tels que reportés par F. Durand-Dastès sont axés sur :

- *« Une confirmation : le passage par les types de temps reste conçu comme une approche de la réalité, une appréhension concrète des états de l'atmosphère, une nécessaire explication de leur fonctionnement ;*
- *Une proposition : le remplacement du type de temps alors pratiqué (ou type de temps lato sensu) par deux approches bien distinctes, d'une part un type de temps (stricto sensu), c'est-à-dire réduit à l'expression de l'ensemble de valeurs qui le décrivent, d'autre part, un type de circulation (ou de situation-circulation) définissant l'ensemble des champs aérologiques ;*
- *Une justification : la mise en avant de la composante atmosphérique a entraîné trop loin du réel perçu-vécu, d'autant que l'absence de correspondance automatique avérée entre la circulation-cause et le temps-produit limite l'intérêt d'une approche unique ;*
- *Une perspective : il semblerait plus efficace de procéder en deux étapes, en élaborant d'abord deux typologies parallèles mais indépendantes (une des types de temps, une des circulations), en les croisant ensuite afin d'aboutir à une synthèse... plus riche ;*
- *Une série d'interrogations sur les implications de cette nouvelle approche, tout spécialement en matière d'échelle. » (Carrega, 2004)*

Quelques années après, en 1976, Dauphiné affirme « *qu'un type de temps n'est pas qu'une moyenne arithmétique, c'est un idéal-type. Il est influencé, en plus de la situation synoptique, par les facteurs géographiques* » (Mounier, 1977), introduisant ainsi la question d'imbrication d'échelles.

En plus de la définition évoquée par Beltrando et Chémery (1995) (voir introduction générale), d'autres auteurs ont défini les types de temps comme étant « *représentant une combinaison de données météorologiques stationnelles (état de l'atmosphère ou le temps qui fait) influencées par les conditions locales et justifiées par la circulation* » (Dahech, 2007).

Quant à l'état de l'atmosphère, c'est le temps qu'il fait d'après Durand-Dastès (2004). La seule différence entre les deux réside dans l'échelle considérée : le type de temps est un cycle de 24 heures défini par plusieurs variables tandis que l'état de l'atmosphère ou météo résume les phénomènes atmosphériques durant une durée inférieure à 24 heures mais pour le même espace : la station de mesure.

Cependant, les échelles des types de circulation sont plus étendues, elles couvrent le champ du mouvement des masses d'air.

Pour l'échelle spatiale, Douguedroit, (2004) associe le terme « type de temps » à une mésoéchelle (quelques dizaines voire une centaine de km) et le terme « types de circulation » à une macro-échelle (plusieurs milliers de km).

Les types de circulation atmosphérique peuvent être identifiés en tenant compte de l'origine des masses d'air, des principaux centres d'action et/ou des flux dominants en surface et en altitude (Barry et Chorley, 2003). Compte tenu de l'échelle spatiale prise en compte, un même type de circulation est susceptible de générer des types de temps très différents d'une région à une autre pour diverses raisons liées au substratum, à la topographie, ... (Planchon *et al.*, 2015).

Une des méthodes utilisées pour la classification des types de circulation est celle de Hess et Brezowsky fondée sur le champ de pression au niveau de la mer et le géopotential à 500 hPa.

Plus l'espace étudié est grand et plus on se rapproche du type de circulation. La circulation générale se situe en amont, un même type de circulation ne produit pas toujours le même type de temps (Martin et Carrega, 2009) (Fig. 1.1).

Un même temps peut avoir des origines différentes. Des circulations anticycloniques, comme cycloniques peuvent donner naissance à un temps couvert à forte nébulosité (Carrega, 2004).

L'intérêt de l'étude des types de temps, notamment pendant la saison chaude, repose sur l'influence et l'impact des conditions météorologiques et des différentes circulations atmosphériques sur l'homme, la végétation et la pollution atmosphérique, particulièrement celle photochimique, surtout dans un contexte de réchauffement climatique.

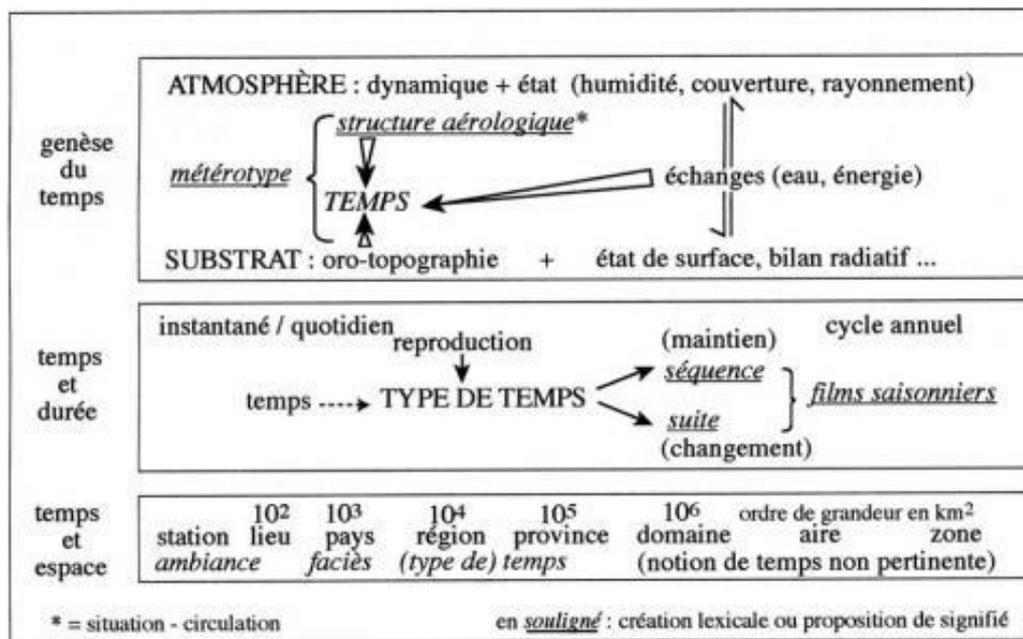


Figure 1.1. Essai de rationalisation du concept de type de temps

(Vigneau, 1986)

## 1.2- Notions théoriques autour des brises thermiques

Les brises thermiques sont des phénomènes de « beau temps ». Elles sont plus fréquentes durant la saison chaude pendant laquelle les conditions de son déclenchement sont plus favorables, à savoir : vent synoptique faible, contraste thermique plus important et stabilité atmosphérique. Elles sont générées par les gradients thermiques entre les différentes surfaces : entre l'amont et la vallée, entre un espace urbain et un espace végétalisé, entre la terre et la mer, .... Selon sa position, un même espace peut être considéré par l'ensemble des différentes brises, mais pendant différentes périodes de la journée (Beltrando *et al.*, 2008).

Comme la température des surfaces conditionne, entre-autres, celle de l'air qui est en contact, le gradient thermique entre deux volumes d'air adjacents peut générer une circulation atmosphérique locale dans les basses couches de l'atmosphère. Ce phénomène se manifeste en absence du vent synoptique ou même lorsque celui-ci est faible. Il se traduit par un changement de la direction et de la vitesse du vent entre le jour et la nuit, ce qui a des impacts sur les températures de l'air et parfois aussi sur la nébulosité et la pluviométrie. Mais, lorsque le vent

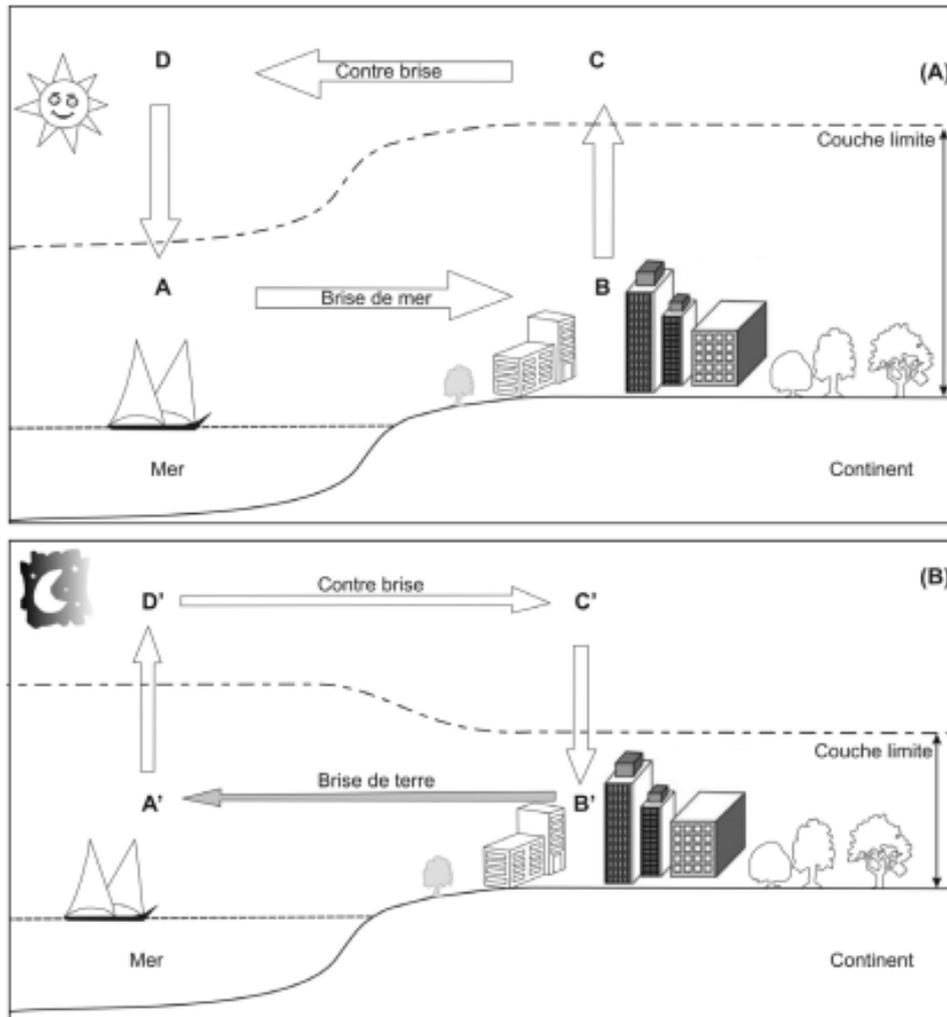
synoptique est présent et relativement fort, il brasse suffisamment l'air et les brises ne sont plus perceptibles (Beltrando *et al.*, 2008).

De par ses propriétés physiques, la manifestation de brises thermiques est plus prononcée lorsque l'une des deux surfaces subit un échauffement pendant le jour ou un refroidissement pendant la nuit relativement important par rapport à l'autre surface : c'est généralement le cas des brises côtières (brises de terre et de mer). Les brises sont également évidentes lorsque le terrain favorise l'écoulement et la canalisation de l'air : ce sont des brises orographiques (brises de pente et brises de vallée), qui peuvent se développer sur plusieurs dizaines de kilomètres et atteindre des vitesses relativement importantes. Dans des environnements plus complexes, comme ceux urbains, la manifestation des brises qui s'attachent à des schémas théoriques est souvent moins évidente car les propriétés et les caractéristiques des surfaces présentes sont plus complexes et que ceci se traduit par des échanges thermiques et des gradients de pression différents. De plus, « *la rugosité ainsi que la topographie du site contraignent les écoulements d'air* » (Beltrando *et al.*, 2008).

### **1.2.1- L'exemple classique des brises littorales**

Le jour, l'air en contact avec une surface continentale s'échauffe plus rapidement qu'en contact avec une surface aquatique. Il s'élève (Fig. 1.2A, branche BC) et la pression diminue en surface par rapport à celle observée sur la mer avoisinante à la même altitude. La différence de pression horizontale qui en résulte génère un mouvement d'air plus frais et donc plus dense, dirigé de la mer vers la terre : c'est la brise de mer (Fig. 1.2A, branche AB). En altitude, l'air réchauffé ascendant contribue relativement au renforcement de la pression en altitude. Le même phénomène se forme en altitude, mais dans le sens inverse qu'en surface. Il s'agit de ce qu'on appelle une contre brise ou courant de retour (Fig. 1.2A, branche CD) (Beltrando *et al.*, 2008 ; Michelot et Carrega, 2014).

La nuit, le phénomène se manifeste dans le sens inverse. Le refroidissement de la surface continentale étant plus rapide que celui de l'eau, génère un vent orienté de la terre vers la mer : c'est la brise de terre (Fig. 1.2B, branche B'A'). A cette période de la journée, l'écart thermique entre les deux surfaces est plus faible, la couche limite au-dessus de la terre est stable (à cause de l'air qui est relativement froid) et le mélange vertical est beaucoup plus restreint. Il en résulte une brise de terre dont l'extension spatiale (horizontale et verticale) et l'intensité sont généralement plus faibles (Beltrando *et al.*, 2008; Samar, 2018).



**Figure 1.2. Schéma simplifié de la brise de mer (A) et de la brise de terre (B)**  
(Beltrando *et al.*, 2008)

Ces vents alternants sont plus fréquents dans les régions à hautes pressions et aux conditions météorologiques stables. Leurs manifestations quotidiennes sont séparées par des transitions appelées renverses dont une matinale (après la brise de terre et précédant la brise de mer) et une nocturne (généralement quelques dizaines de minutes après le coucher du soleil et qui suit la brise de mer et précède la brise de terre) (Beltrando *et al.*, 2008 ; Carrega, 2013).

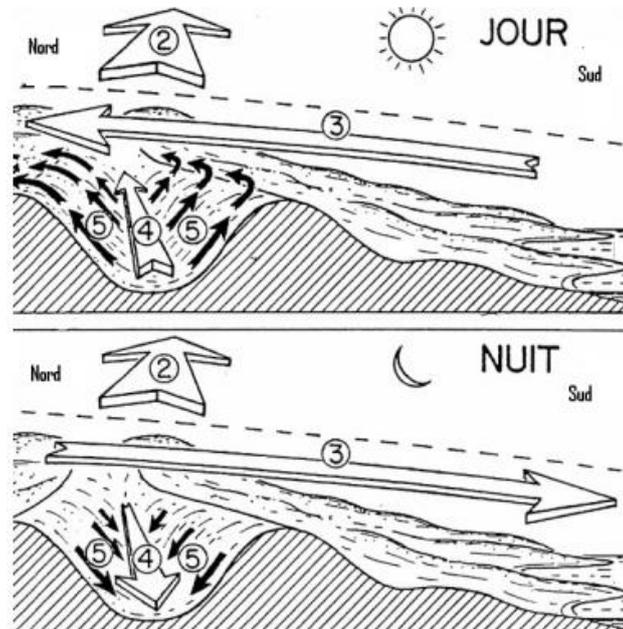
### 1.2.2- Les brises orographiques : l'influence de la canalisation par le relief

Un relief, même s'il est relativement modeste, et avec des conditions météorologiques favorables (temps calme<sup>2</sup>), peut influencer les gradients thermiques et conduit ainsi à la

<sup>2</sup> La situation du calme est définie sur l'échelle de Beaufort comme un vent qui ne dépasse pas les 0,27 m/s (soit 1 km/h). Selon MétéoFrance, un vent calme peut aller jusqu'à 0,55 m/s (soit 2 km/h au maximum).

formation de vents alternants quotidiens qui sont canalisés par cette topographie. Les fonds de vallée et les versants les plus exposés au soleil se réchauffent plus que ceux qui le sont moins. Cet air réchauffé s'élève le long des pentes et donne lieu à un vent ascendant (anabatique) appelé la brise de vallée (Fig. 1.3). La nuit, la perte de rayonnement terrestre entraîne un refroidissement de la surface et de l'air sus-jacent, quelles que soient les conditions météorologiques. Lorsque ces dernières sont stables, cet air froid de surface plus dense et plus lourd s'écoule par gravité vers les cuvettes et les fonds de vallées. Ils se génèrent ainsi des vents catabatiques (descendants) : ce sont des brises de montagne (ou brises de montagne). Lorsque la topographie est importante et le bassin versant est étendu, ce vent catabatique peut atteindre une vitesse de 10 m/s environ, surtout lorsque la nuit est déjà avancée. Dans ce cas, cette brise peut se développer sur plusieurs dizaines de kilomètres vers l'aval de la vallée (Damato *et al.*, 2003 ; Beltrando *et al.*, 2008).

Les éléments présents dans l'environnement considéré qui ont l'aptitude à refroidir plus l'air sus-jacent, comme les glaciers, peuvent être à l'origine d'une accélération de l'écoulement de l'air froid le long de la pente et cet air froid superficiel peut s'écouler vers la vallée, en dessous d'une brise de vallée... (Planchon *et al.*, 2004 ; Beltrando *et al.*, 2008)



**Figure 1.3. Exemples de vent synoptique et de brises (littorales et orographiques) interférant les uns avec les autres (La flèche n° 2 indique un vent synoptique qui ne change pas de sens entre le jour et la nuit, la flèche 3 montre la brise de mer (jour) ou de terre (nuit), les flèches 4 et 5, le système des brises orographiques)**

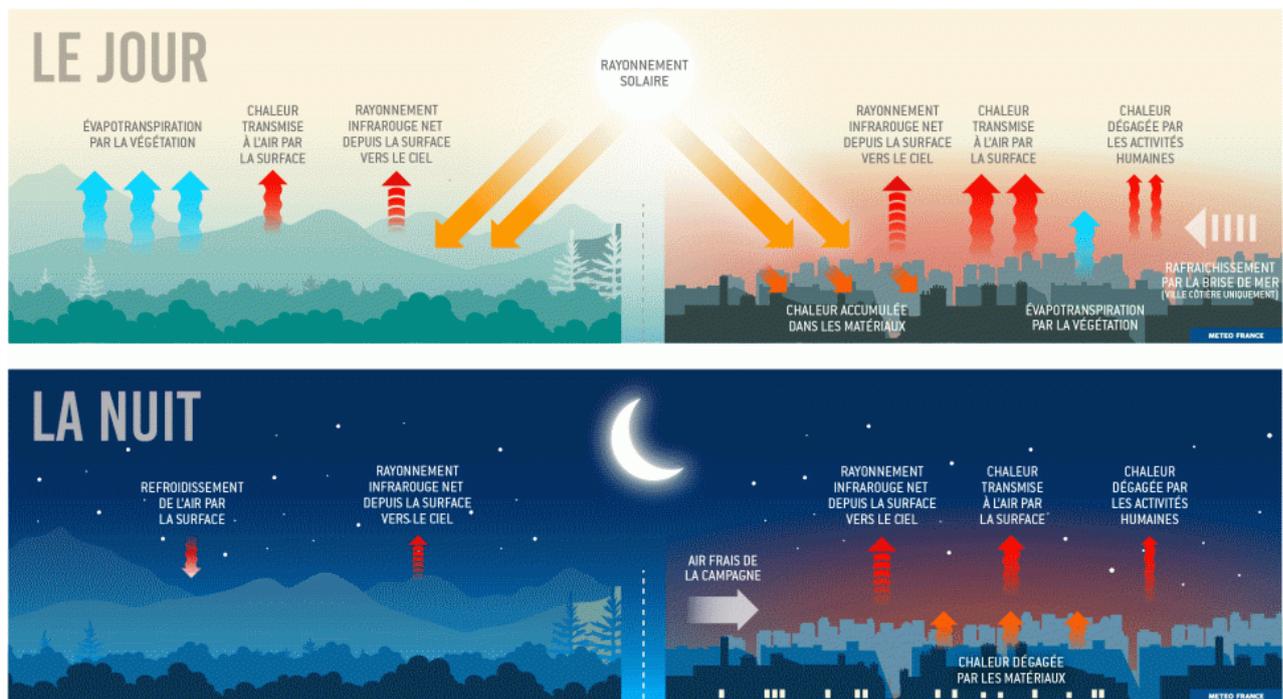
(Carrega, 1989)

### 1.2.3- Les brises urbaines : des contraintes multiples

Le contraste thermique entre les zones urbaines et les zones rurales adjacentes pendant la journée peut créer des brises urbaines (Oke, 1982). Passant par les banlieues, l'air rural se dirige vers les points chauds urbains. Au-dessus de la ville, en surface, l'air est ascendant. En altitude, par divergence, l'air retourne vers les zones rurales. Les brises urbaines se produisent surtout par temps calme et anticyclonique et par fort rayonnement solaire (Fischer, 2005 ; Beltando *et al.*, 2008).

Mettre l'accent et expliquer les brises devient encore plus difficile lorsque l'environnement est caractérisé par une grande variabilité spatiale de la nature et des caractéristiques de l'occupation du sol et de sa rugosité, comme c'est particulièrement le cas dans les zones urbaines. Cette difficulté vient du fait que les matériaux utilisés dans les espaces urbains ont des natures et caractéristiques thermiques différentes comme c'est le cas du contraste entre les surfaces imperméables (asphalte, toitures, etc.) et les surfaces très perméables (jardins, parcs, etc.). Ceci affecte et explique les variations des flux d'énergie (flux de chaleur latente et sensible) et des flux de rayonnement (réflexion et absorption) (Beltrando *et al.*, 2008).

Les brises thermiques qui se manifestent en ville sont aussi influencées par le bâti et par des facteurs d'échelle microclimatiques, tels l'ombre, les espaces urbains végétalisés, la couleur des façades, .... Il peut en découler, dans certaines agglomérations, des brises s'écoulant de la périphérie vers le centre. Ce cas est cité par Escourrou (1990) et Cantat (2004) en évoquant la présence d'une brise de campagne qui converge vers le centre de l'agglomération parisienne où se forme un îlot de chaleur urbain au-dessus duquel les mouvements sont turbulents et contribuent à l'appel de la brise de campagne (Fig. 1.4).



**Figure 1. 4. L'îlot de chaleur urbain et brise de campagne**

(MeteoFrance, 2021, web)

À une échelle spatiale plus fine intra urbaine (rue, îlot d'habitation...), des mouvements de l'air similaires peuvent se produire. C'est le cas, par exemple, de la brise qui se génère entre un espace végétalisé et un espace imperméabilisé à proximité ou encore entre une façade à l'ombre et une exposée au soleil.

La complexité de la description du fonctionnement des brises thermiques est en fonction de la complexité du milieu concerné. Une réflexion particulière doit être attribuée au choix des niveaux d'échelles à prendre en compte dans (1) le choix des points de mesure et de leur représentativité dans les campagnes itinérantes et (2) le choix des entrées du modèle de prévision qui sont variables dans le temps et dans l'espace. (Beltrando *et al.*, 2008).

Si les brises thermiques ont des effets positifs, d'autres sont plutôt néfastes où elles peuvent, par exemple, contribuer à la concentration des polluants (Beltrando *et al.*, 2008). La prévision de ce phénomène peut s'obtenir à partir de variables météorologiques classiques (température à la surface de l'eau et de la terre, situation météorologique d'échelle synoptique...). Avec une échéance convenable (quelques heures), cette prévision permet d'informer les personnes concernées, notamment celles les plus fragiles à la pollution de l'air.

### 1.3- Notions théoriques autour du vent de sirocco

L'appellation de ce vent diffère d'un pays à l'autre. Il est appelé « Chili ou Chehili » en Afrique du Nord, « Guibli » en Libye, « Khamsin » en Egypte, « Levèche » au Sud-Est de l'Espagne et « Marin » dans le golfe du Lyon (Meteorological office, 1962).

A l'origine de ce vent nous trouvons essentiellement des facteurs azonaux : l'extension d'un désert chaud au sud de la Méditerranée, la disposition du relief autour de cette mer ainsi que les caractéristiques de certaines parties des côtes méditerranéennes comme les golfes de Gênes, du Lion et de Gabès qui favorisent la formation des dépressions qui, à leur tour, attirent le sirocco (Henia, 1980).

Difficile à supporter surtout par les personnes sensibles, notamment lorsqu'il est accompagné par un vent de sable. De par ses caractéristiques, le sirocco est favorable à la dégradation de la qualité de l'air en milieu urbain, notamment lorsque le réseau industriel dans son espace est très dense comme l'agglomération de Bizerte. Aussi, il peut causer des incendies de forêt (Belhadj Khedher *et al.*, 2020). Il peut également toucher les pays de la rive nord de la Méditerranée comme le cas du mardi 20 juin 2023 (Fig. 1.5) où un flux de sud entre 800 et 3000m d'altitude (700hPa sur l'échelle à gauche) envoie de l'air chaud et très sec (écart entre ligne noire et ligne bleue sur ces radio-sondages) d'origine saharienne. En Corse du Sud, la chaleur est accentuée par des phénomènes de foehn locaux.

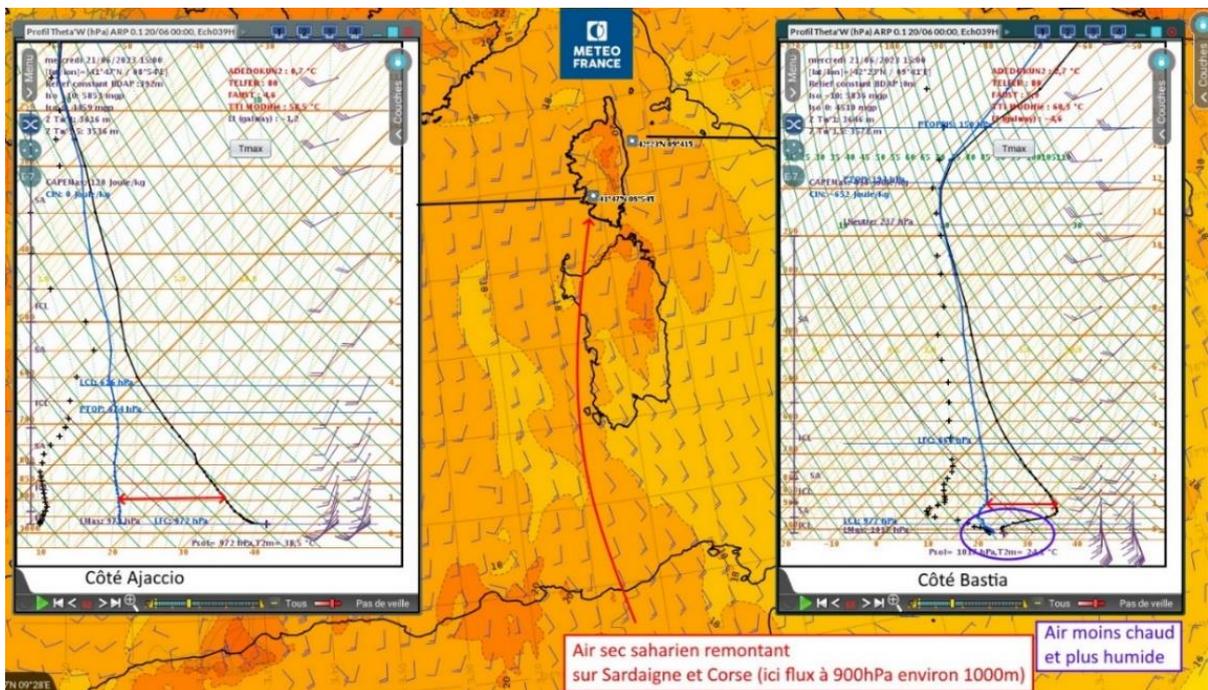
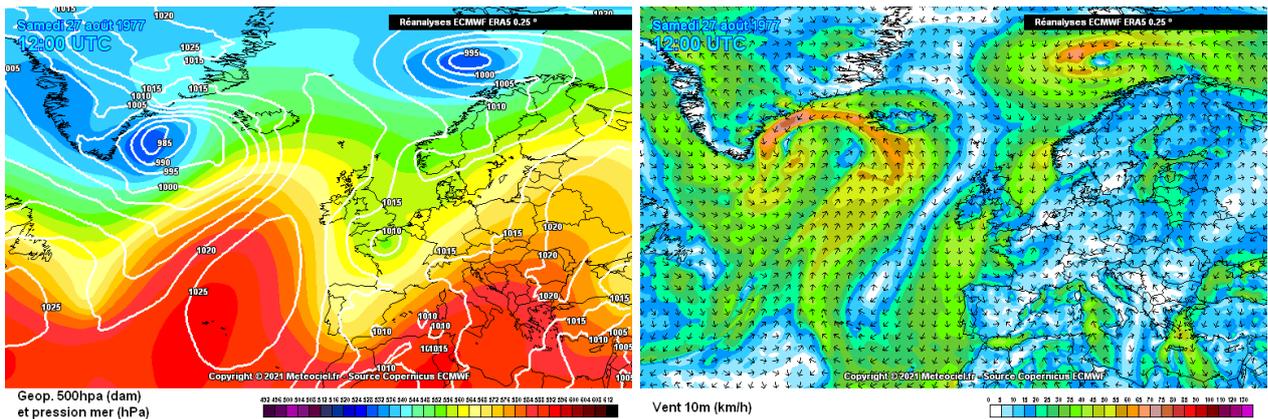


Figure 1. 5. Cas du sirocco enregistré le mardi 20 juin 2023

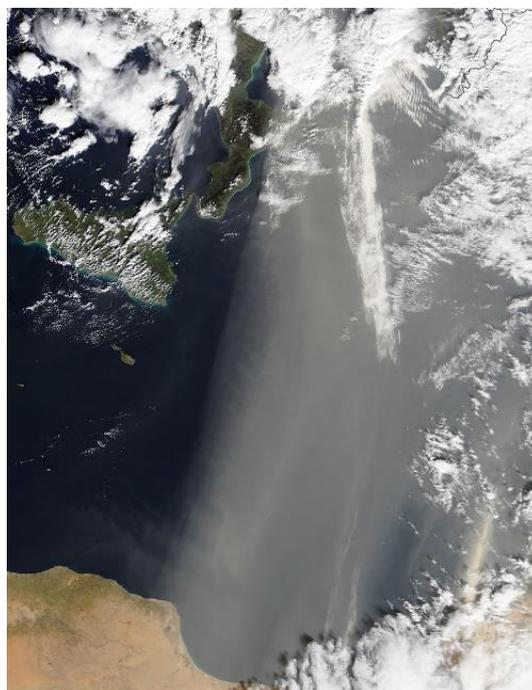
(Météo-France-Sud-Est)

L'Agence Météorologique Nationale Espagnole a averti la population, en mars 2022, que des pluies de boue peuvent survenir suite aux vents de sable qui ont teinté les pistes de ski et des montagnes des poussières brunes (AEMET, web).

En Tunisie, les études consacrées au sirocco datent de l'année 1980 (Henia, 1980). Dans cet article sont évoqués des cas de sirocco en hiver, d'autres en été (Fig. 1.6). Les siroccos de l'hiver concernent aussi les pays de la rive nord de la Méditerranée (Fig. 1.7).



**Figure 1. 6. Cartes du géopotiel 500 hPa et du vent de la date du 27/08/1977 à 12h UTC (exemple évoqué par Henia, 1980)**  
(Modèle GFS, site web de Meteociel)



**Figure 1. 7. Sirocco qui transporte des poussières désertiques en provenance du Sahara vers l'Italie, le 8 février 2018**  
(NASA Earth Observatory / Jeff Schmaltz / MODIS)

Dahech (2007) a analysé les caractéristiques météorologiques du sirocco et ses impacts sur l'agriculture et la qualité de l'air. Belhadj Khedher, en 2020, a analysé la relation entre le sirocco et les incendies des forêts en Tunisie.

En Tunisie, quand la vitesse du sirocco est assez forte ( $> 5$  m/s), il peut acheminer du sable et de la poussière d'origine industrielle ou éolienne (arrachées au sol) ce qui contribue à la dégradation de la qualité de l'air et le rend difficile à respirer. Sa longue trajectoire sur le Sahara, rend le sirocco capable de soulever les particules très abondantes dans le Sud tunisien et relativement meubles en saison sèche, conduisant ainsi à une réduction considérable de la visibilité. Ces poussières éoliennes présentent aussi un risque pour la santé (Hénia, 1980; Coudé-Gaussen, 1991; Hénia et Mougou, 1997; Dahech *et al.*, 2007; Ben Romdhane, 2017).

## **1.4- Concepts autour de la pollution atmosphérique**

### **1.4.1- Définition de la pollution atmosphérique**

On entend par pollution atmosphérique : *« l'introduction dans l'atmosphère par l'homme, directement ou indirectement, de substances ou d'énergie ayant une action nocive de nature à mettre en danger la santé de l'homme, à endommager les ressources biologiques et les écosystèmes, à détériorer les biens matériels, et à porter atteinte ou nuire aux valeurs d'agrément et aux autres utilisations légitimes de l'environnement. L'expression "polluants atmosphériques" est entendue dans le même sens »*. (Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, 1979, Article 1, Point a).

Selon Mayer (1999), les sources de cette pollution sont soit naturelles (feu de forêt, éruption volcanique, ...), soit anthropiques, c'est-à-dire liées à l'activité humaine.

L'intérêt de l'étude de la pollution atmosphérique repose sur les résultats des études qui ont montré un lien étroit entre la dégradation de l'environnement (présence de ces polluants dans l'atmosphère) et de la santé humaine (Kulkarni, *et al.*, 2008 ; FNORS, Septembre 2008 ; Monk *et al.*, 2009 ; Anderson, 2009). Les impacts négatifs de la pollution atmosphérique s'étendent pour englober les phénomènes de pluies acides qui contribuent à la dégradation de la végétation ou encore du réchauffement terrestre (Hugonie, 1998).

### **1.4.2- Typologie des polluants atmosphériques**

Deux grandes catégories de polluants peuvent être distinguées : les polluants primaires (émis directement) et les polluants secondaires (qui se forment dans l'air).

#### **1.4.2.1- Les polluants primaires**

Les polluants primaires sont principalement émis dans l'atmosphère. Leurs principales sources sont le trafic routier, les industries, le chauffage, l'agriculture, ...

Il s'agit par exemple :

- Des oxydes de carbone
- Des oxydes de soufre
- Des oxydes d'azote
- Des hydrocarbures légers
- Des composés organiques volatils (COV)
- Des particules (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>)
- Des métaux (plomb, mercure, cadmium...)

#### **1.4.2.2- Les polluants secondaires**

Les polluants secondaires ne sont pas directement rejetés dans l'atmosphère, mais ils proviennent de réactions chimiques ou photochimiques de gaz entre eux. C'est le cas notamment:

- Des particules secondaires
- De l'ozone (O<sub>3</sub>)
- Du dioxyde d'azote...

Certains polluants comme le dioxyde d'azote et les particules sont à la fois des polluants primaires et secondaires (AIRPARIF, web).

L'atmosphère polluée est souvent associée aux activités humaines soit industrielles ou domestiques (sources anthropiques), mais plusieurs contaminants sont émis dans l'atmosphère par des phénomènes naturels. Certains polluants sont même émis en quantités plus importantes par la nature que par l'Homme. Les problèmes les plus sérieux sont toutefois observés dans les zones urbaines ou à proximité des zones industrielles là où se concentrent les émissions d'origine anthropique.

#### **1.4.3- Unités de mesure de la pollution atmosphérique :**

La pollution peut être observée sous différentes formes. A chacune de ces formes correspond un type et des unités de mesure adaptées au questionnement de départ. La concentration d'un polluant peut s'exprimer de manière relative ou par unité de mesure :

Pour les gaz, en concentration relative :

- ppm ou ppmv = partie par million en volume ( $10^{-6}$ ) soit  $1\text{cm}^3/\text{m}^3$ , c'est-à-dire : sur un million de molécules d'air, on trouve une molécule du polluant en question ;
- ppb ou ppbv = partie par milliard (billion en anglais) en volume ( $10^{-9}$ ) soit =  $1\text{mm}^3/\text{m}^3$ ;
- ppt ou pptv = partie par trillion en volume ( $10^{-12}$ ), unité rarement employée avec les concentrations des polluants « courants ».

Pour les gaz et particules : ils sont mesurés en masse par unité de volume :

- $\text{mg}/\text{m}^3 = 10^{-3}$  g par  $\text{m}^3$  d'air (milligramme) ;
- $\mu\text{g}/\text{m}^3 = 10^{-6}$  g par  $\text{m}^3$  d'air (microgramme) ;
- $\text{ng}/\text{m}^3 = 10^{-9}$  g par  $\text{m}^3$  d'air (nanogramme) (Deletraz, 2002)

#### 1.4.4- Les différentes échelles de la pollution atmosphérique :

Nous pouvons scinder la pollution atmosphérique en trois catégories (Tab. 1.1) :

**Tableau 1. 1. Les différentes échelles de la pollution atmosphérique**

(Philippe, 2004)

Echelle de pollution	Source	Lieu d'affectation
Pollution de proximité à l'échelle locale	Sources d'émission de gaz ou d'autres substances indésirables le plus souvent produites en milieu urbain (industries, chauffage, trafic...)	Groupements de population à proximité
Pollution à l'échelle régionale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollution photochimique</li> <li>• Rejets accidentels (Exp : Tchernobyl)</li> <li>• Pluies acides</li> </ul>	Les zones situées à quelques dizaines de kilomètres (voire des centaines de kilomètres) des sources d'émission de pollution
Pollution planétaire ou globale	Activités humaines produisant des polluants nocifs à l'atmosphère (Exp : les CFC nocifs à la couche d'ozone stratosphérique)	Echelle planétaire

#### 1.4.5- Passage en revue des polluants étudiés à Bizerte

Partant des constatations et lectures bibliographiques, ainsi que les observations et remarques relevées sur le terrain lors des mesures semi- itinérantes, nous avons opter à intégrer

dans l'étude, en plus de l'ozone troposphérique ( $O_3$ ), le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ), le dioxyde d'azote ( $NO_2$ ), les particules fines  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  et le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Dans ce qui suit un passage en revue des caractéristiques de ces polluants :

- **Le dioxyde de soufre ( $SO_2$ )** : ce gaz est toxique et produit suite à certains procédés industriels comme les industries métallurgiques et les raffineries de pétrole ou naturellement par les volcans. Il contribue à la création des particules (aérosols sulfuriques) opaques aux rayons solaires et peut jouer ainsi un rôle de refroidissant de la planète (Pascal, 2009).

- **Les oxydes d'azote ( $NO_x$ )** : dans cette famille, on trouve notamment le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote ( $NO_2$ ), deux gaz fortement toxiques qui résultent de l'oxydation de l'azote de l'air par l'oxygène à température élevée suite à un processus de combustion (comme dans les moteurs à combustion interne et les centrales thermiques) (Hugonie, 1998).

Les fortes concentrations de ces gaz sont plus observées dans les zones ayant une forte circulation automobile. Le NO en réagissant avec l'oxygène de l'air pour se transformer en  $NO_2$ .

- **Les particules en suspension** : ces particules (notées « PM » en anglais pour « Particulate Matter ») peuvent être soit solides, soit liquides en suspension dans l'air. La directive 1999/30/CE les identifie comme étant « *les particules passant dans un orifice d'entrée calibré avec un rendement de séparation de 50% pour un diamètre aérodynamique de  $10\ \mu m$  (cas des  $PM_{10}$ ) ou de  $2,5\ \mu m$  (cas des  $PM_{2,5}$ )* ». Elles peuvent avoir des origines naturelles comme les éruptions volcaniques, la végétation (pollens...), les incendies de forêts... ou anthropiques telles que les émissions industrielles, la combustion des combustibles fossiles ... Suivant leurs diamètres, ces particules, peuvent être désignées par les abréviations suivantes (C.E., 2008) :

- «  $PM_{10}$  d'un diamètre aérodynamique inférieur à  $10\ \mu m$  ;
- $PM_{2,5}$  dont le diamètre est inférieur à  $2,5\ \mu m$ , appelées « particules fines » ;
- $PM_1$  dont le diamètre est inférieur à  $1,0\ \mu m$ , appelées « particules très fines » ;
- $PM_{0,1}$  dont le diamètre est inférieur à  $0,1\ \mu m$ , appelées « particules ultrafines » ou nanoparticules. »

- **L'ozone troposphérique ( $O_3$ )** : Ce gaz se forme dans la basse atmosphère et sous des conditions climatiques particulières où est nécessaire d'avoir une forte intensité

de rayonnement solaire (les ultra-violets). La présence de ses précurseurs est aussi très importante, notamment en zone urbaine où les hydrocarbures et les oxydes d'azote sont donc produits en grande quantité. C'est un gaz qui réagit en continu avec ses précurseurs et ses destructeurs ce qui conditionne le niveau de sa concentration (Al Barakeh, 2012).

C'est dans les zones rurales proches des agglomérations où on enregistre les plus fortes concentrations en O<sub>3</sub> en absence d'agents destructeurs. Par ailleurs, dans les sites à fort trafic routier, l'O<sub>3</sub> est détruite par certains polluants primaires. Pour ces raisons, « *l'O<sub>3</sub> est considéré comme le traceur majeur de la pollution photochimique* » (Al Barakeh, 2012).

- **Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)** : est un gaz incolore, inerte et non toxique. Sa molécule est composée de deux atomes d'oxygène et d'un atome de carbone.

Les sources naturelles de CO<sub>2</sub> sont diverses :

- Éruptions volcaniques
- Respiration des plantes, des animaux et des hommes
- Incendies naturels de forêts
- Décomposition de la matière organique morte

C'est un gaz d'origine humaine qui provient de la combustion des énergies fossiles, en particulier le charbon, le pétrole et le gaz. La production de ciment produit beaucoup de CO<sub>2</sub>. Enfin, des activités humaines comme la déforestation ou l'étalement urbain augmentent l'émission anthropique de gaz carbonique puisque la photosynthèse agit naturellement comme un puit qui capte le gaz en question ([perspective.usherbrooke.ca](http://perspective.usherbrooke.ca), web). Le CO<sub>2</sub> peut être produit au stade ultime d'oxydation des matières contenant du carbone ([wallonair](#), web).

La législation française ne le considère pas comme un polluant du fait de sa présence naturelle dans l'atmosphère et de son rôle dans le cycle de la vie. Toutefois, le dioxyde de carbone est le principal gaz à effet de serre à l'état naturel, avec la vapeur d'eau. Approximativement, sa durée de vie dans l'atmosphère est de l'ordre de 100 ans. Il dispose aussi d'un très haut pouvoir de dissolution dans les muqueuses du corps humain et provoque de nombreuses réactions dès que sa concentration dans l'air inspiré augmente.

Pour des concentrations voisines de 0,1 %, le CO<sub>2</sub> modifie le rythme respiratoire chez les personnes fragiles ou souffrant d'insuffisances respiratoires. Des

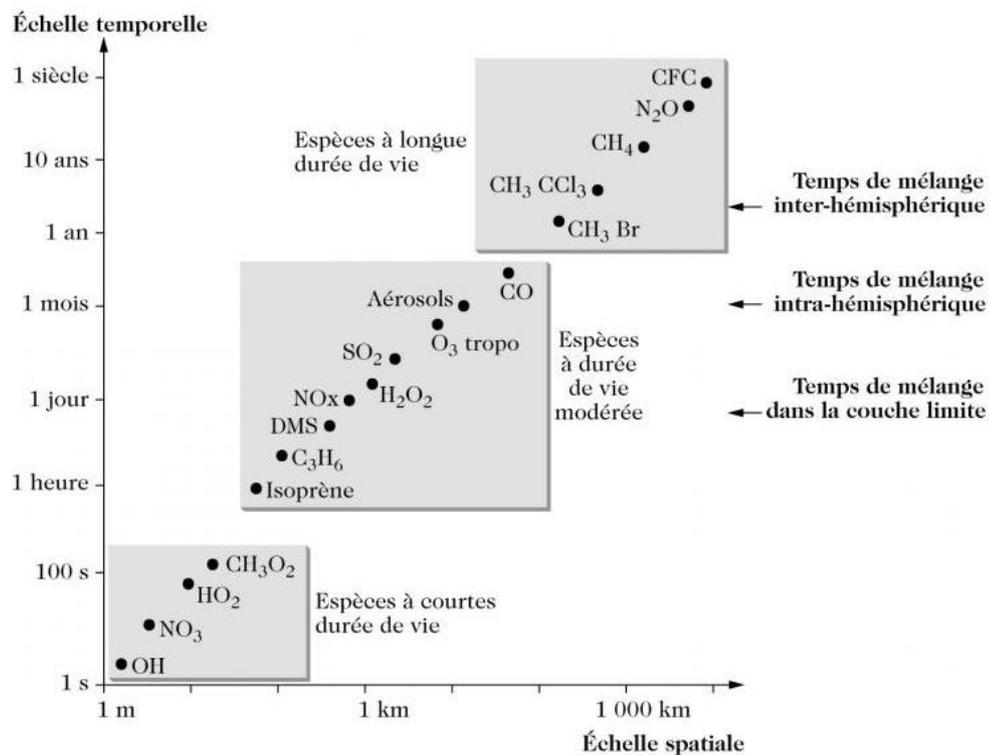
niveaux supérieurs à 1000 ppm (0,1 %) en milieu clos peuvent entraîner des crises d'asthme.

Dans un environnement professionnel, la concentration maximale admise pour le CO<sub>2</sub> est limitée à 0,5 % (5 000 ppm), mais la France n'a pas adopté cette norme.

En effet, les valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) ont changé au 1<sup>er</sup> juillet 2020, mais elles concernent uniquement le monoxyde de carbone, CO, pour les polluants carbonés.

Depuis la ratification de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, la Tunisie s'est tenue à respecter les directives et les normes recommandées par la CCNUCC. L'inventaire des émissions de gaz à effet de serre (GES) dues à l'énergie en Tunisie sur la période 1980-2008, a été élaboré selon les nouvelles directives du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le calcul des émissions a été fait selon la méthodologie du GIEC de l'année 2006.

La variabilité spatio-temporelle des polluants est en fonction de leurs durées de vie ou résidence dans la troposphère. Ceux qui ont un temps de vie de plusieurs jours contribuent à la pollution de fond suite à leur transport sur de longues distances par les vents (Fig. 1.8).



**Figure 1. 8. Échelles caractéristiques de la pollution atmosphérique**

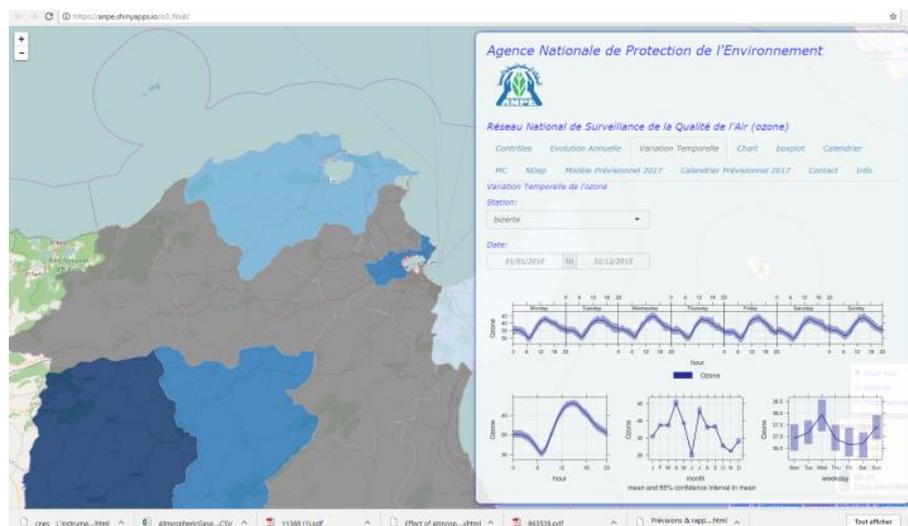
(OMER7A, web)

#### 1.4.6- Bases de données sur la qualité de l'air

Les données sur la qualité de l'air à l'échelle internationale proviennent de différentes bases de données, y compris : la base de données canadienne sur la qualité de l'air (RSQAQ), la base de données AirBase Viewer de l'Union européenne et le système de qualité de l'air (AQS) de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (USEPA). Certaines des données relatives à l'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>) et aux PM<sub>2,5</sub> pour des zones urbaines individuelles provenaient des rapports ou des sites web sur la qualité de l'air du pays (Australie, Paris et Londres).

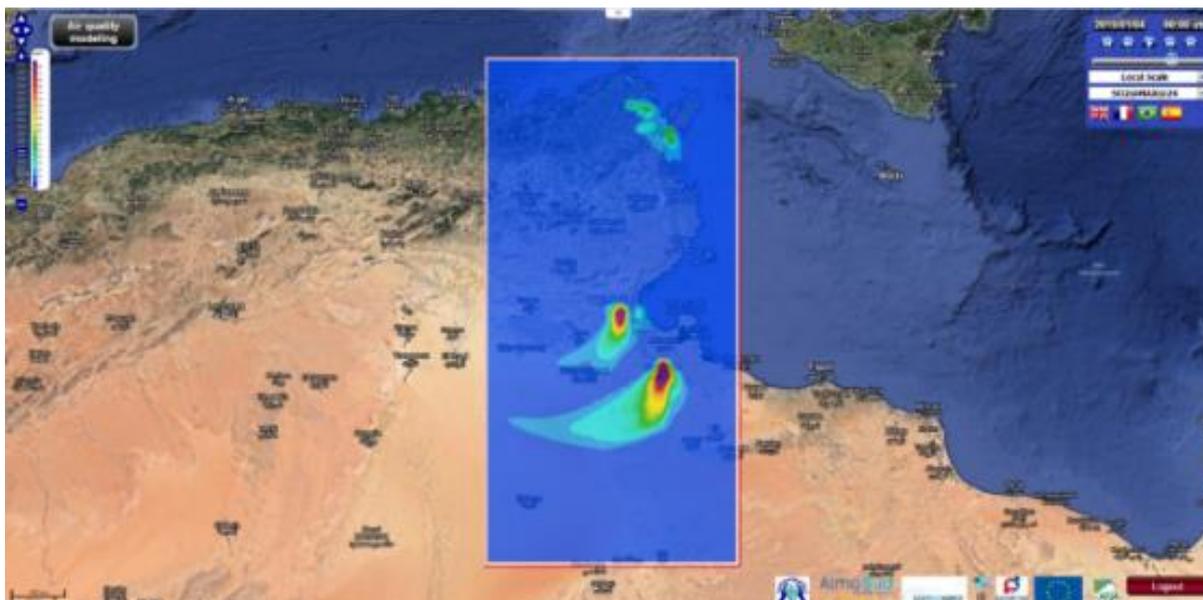
En Tunisie, La Direction de contrôle et d'intervention de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE) dispose de plusieurs stations fixes pour le contrôle et la surveillance de la qualité de l'air dans les endroits jugés exposés à une pollution atmosphérique (Bizerte, Bab Saadoun, Ben Arous, Radès et Sfax). En plus de ces différentes stations fixes, la RNSQA dispose d'une station mobile équipée pour l'analyse des polluants classiques (O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et PS) et pour la mesure des paramètres météorologiques (Température, hygrométrie, vitesse et direction de vent). Le laboratoire mobile permet des interventions souples et rapides pour estimer la qualité de l'air dans les zones non équipées de stations fixes.

Une cartographie dynamique est accessible à travers le site web de l'ANPE (Fig. 1.9 et Fig. 1.10).



**Figure 1. 9. Site web de l'ANPE relatif aux mesures de la pollution de l'air et aperçu de son contenu**

(ANPE web : ([https://anpe.shinyapps.io/o3\\_final](https://anpe.shinyapps.io/o3_final) : Site inaccessible ou instable en 2023))



**Figure 1. 10. Le site de la nouvelle plateforme web pour sur la pollution atmosphérique  
TUN' AIR**

(ANPE web : [www.anpe-tunair.tn](http://www.anpe-tunair.tn) : Site inaccessible en 2023)

#### **1.4.7- Indicateurs de suivi des polluants atmosphériques**

Les indicateurs de pollutions atmosphérique sont appliqués dans de nombreux pays du monde, dont tous les pays industrialisés. Ils sont orientés vers des actions opérationnelles ou aussi à caractère de recherche.

**1.4.7.1- Les indicateurs opérationnels :** ils sont ceux utilisés par différentes échelles de prise de décision. Ils peuvent être intégrés dans un système de gestion de la pollution atmosphérique où on trouve généralement :

- Les normes et les systèmes de surveillance de la qualité de l'air,
- Les outils de contrôle des émissions (taxes sur les émissions, permis d'émissions, fiscalisation, normes de qualité des combustibles...),
- Les outils de modélisation et de prévision des pollutions
- Les outils de communication, ainsi que les procédures d'alerte pour les pics d'émissions des polluants
- Les plans pour la qualité de l'air et protection de l'atmosphère (Garcia *et al.*, 2001).

**1.4.7.2- les indicateurs de recherche :** Souvent plus complexes que les indicateurs opérationnels, ils sont développés dans le but d'évaluer un aspect particulier des pollutions

atmosphériques. Ils sont complémentaires aux indicateurs opérationnels soit par l'aide à l'évaluation ou à la communication ou aussi à la décision. A titre d'exemple, un indicateur comme le seuil critique, englobe les trois finalités en même temps, dans la mesure où satisfait les informations nécessaires pour aider à l'évaluation ou à la communication. En prenant comme valeur de référence la valeur guide de l'OMS ou une autre, il pourrait aussi répondre à la finalité d'aide à la décision.

En **Tunisie**, deux indices sont pris en compte : l'Indice ATMO et l'Indice de risque

1) **Indice ATMO** : L'indice ATMO (Tab 1.2) est un paramètre utilisé chaque jour pour caractériser la qualité de l'air d'une agglomération grâce à un chiffre allant de 1 : très bon à 10 : très mauvais. Il est le résultat agrégé de la surveillance de quatre polluants : le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>) et les particules fines (PM<sub>10</sub> particules fines avec un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm qui représentent respectivement 80 à 90% des poussières totales TSP). Les valeurs des indices représentatifs de la situation moyenne de la qualité de l'air sont illustrées par le tableau ci-après :

**Tableau 1. 2. Grille de calcul de l'indice ATMO** provenant de l'arrêté du 21 décembre 2011 modifiant l'arrêté 22 juillet 2004 relatif aux indices de la qualité de l'air (AirPACA<sup>3</sup>, web)

Sous-Indice	Qualificatif	Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	Ozone (O <sub>3</sub> )	Particules (PM <sub>10</sub> )
		Moyenne horaire glissante (µg/m <sup>3</sup> )	Moyenne horaire glissante (µg/m <sup>3</sup> )	Moyenne horaire glissante (µg/m <sup>3</sup> )	Moyenne sur 24h (µg/m <sup>3</sup> )
1	Très bon	0 à 39	0 à 29	0 à 29	0 à 6
2	Très bon	40 à 79	30 à 54	30 à 54	7 à 13
3	Bon	80 à 119	55 à 84	55 à 79	14 à 20
4	Bon	120 à 159	85 à 109	80 à 104	21 à 27
5	Moyen	160 à 199	110 à 134	105 à 129	28 à 34
6	Médiocre	200 à 249	135 à 164	130 à 149	35 à 41
7	Médiocre	250 à 299	165 à 199	150 à 179	42 à 49
8	Mauvais	300 à 399	200 à 274	180 à 209	50 à 64
9	Mauvais	400 à 499	275 à 399	210 à 239	65 à 79
10	Très mauvais	sup à 500	sup à 400	sup à 240	sup à 80

2) **Indice de risques** : La quantification est basée sur le calcul d'une concentration inhalée (CI) (µg/m<sup>3</sup>) et d'un indice de risque (IR), qui se présente, à titre d'exemple pour les effets toxiques aigus, de la manière suivante :

<sup>3</sup> AtmoSud Provence Alpes Côte d'Azur (AtmoSud), Association (nouveau nom d'Air Paca)

CI = Cmax (Concentration maximale journalière de polluant considéré dans l'air)

Lorsque le risque est lié à une exposition via l'inhalation, l'IR correspond au maximum des IRi calculés pour chaque commune. Ce paramètre est déterminé par la formule suivante :

$$IR = CI/Cref$$

Cref ( $\mu\text{g}/\text{m}_3$ ) : concentration journalière tolérable (au sens concentration de référence)

## 1.4.8- Directives et normalisation internationales et nationales

### 1.4.8.1- Définitions des normes de la qualité de l'Air

Avertis par le caractère dangereux de ces polluants, les organisations internationales, les communautés des pays (UE), ainsi que les pays ont adopté des directives et des normes mises en place pour limiter et contrôler les émissions polluantes des principales sources anthropiques et également permettre la surveillance des polluants réglementés avec des objectifs de qualité aux différentes échelles de prise de décision.

Ces lignes directrices sont fondées sur l'évaluation par des experts des données scientifiques et sont applicables aux environnements extérieurs et intérieurs.

**Objectif de qualité** : un niveau de concentration de polluants atmosphériques à atteindre à long terme. Son objectif est d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans sa globalité.

**La valeur guide** est une valeur minimale définie par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) à partir de laquelle des effets sur la santé sont observés (au niveau d'une population).

**La norme de qualité de l'air ou d'émission** défini par un compromis entre les différents acteurs, et devant être respecté. Il représente un niveau de qualité de l'air ou d'émission fixé par les autorités compétentes

**L'objectif de qualité** correspond à un niveau à atteindre sur une période définie en vue de protéger la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble

**La valeur limite** correspond à un niveau à ne pas dépasser pour éviter les effets nocifs d'un polluant.

**Le seuil de recommandation et d'information** au seuil à partir duquel les pouvoirs publics doivent informer la population en diffusant des messages de recommandations d'ordre sanitaires.

**Le seuil d’alerte** correspond au niveau présentant un risque pour la santé humaine même avec une exposition de courte durée. A partir de ce seuil, les pouvoirs publics doivent prendre les mesures nécessaires pour limiter les émissions responsables et diffusent des recommandations sanitaires élargies.

Les valeurs de référence peuvent être communiquées soit en unité de concentration ou bien par percentile. Ce dernier est défini comme le pourcentage de mesures en dessous de la valeur de référence. Par exemple, le percentile 98 signifie que 2% des mesures seulement sont tolérées au-dessus de cette valeur. Le percentile est souvent exprimé en nombre de dépassements de la valeur de référence.

#### **1.4.8.2- Des seuils de qualité de l'air plus strictes par l’OMS**

Les Lignes directrices mondiales de l’OMS sur la qualité de l’air présentent des orientations sur les seuils et les limites des principaux polluants atmosphériques qui constituent des risques pour la santé.

L'OMS explique que depuis la dernière édition de ses lignes directrices mondiales en 2005, « *la quantité de données factuelles montrant que la pollution atmosphérique a une incidence sur différents aspects de la santé a sensiblement augmenté* » (OMS, Communiqué de presse, 2021, web). Sur un plan pratique, les seuils de référence de concentrations des principaux polluants atmosphériques ont été mis à jour, notamment pour trois polluants critiques en Europe et en France : le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), les particules (PM) et l'ozone (O<sub>3</sub>).

Le 22 septembre 2021, L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a adopté de nouvelles lignes directrices mondiales plus strictes sur la qualité de l'air et recommande le respect de nouveaux seuils de concentration de polluants atmosphériques plus strictes (Tab 1.3).

Pour le NO<sub>2</sub>, la concentration moyenne maximale recommandée sur une année est passée de 40 à 10 microgrammes par mètre cube d'air (µg/m<sup>3</sup>). Un autre seuil est créé pour la concentration calculée sur vingt-quatre heures (25 µg/m<sup>3</sup>).

Les nouveaux seuils recommandés sur vingt-quatre heures des particules sont abaissés de 25 à 15 µg/m<sup>3</sup>, pour les PM<sub>2,5</sub>, et de 50 à 45 µg/m<sup>3</sup>, pour les PM<sub>10</sub>. La concentration moyenne maximale recommandée sur une année est divisée sur deux (de 10 à 5 µg/m<sup>3</sup>), pour les PM<sub>2,5</sub>, et est passé de 50 à 45 µg/m<sup>3</sup>, pour les PM<sub>10</sub>. Les particules en suspension et la pollution de l'air extérieur ont été classées comme cancérogènes par le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) relevant de l’OMS.

Le seuil de l’ozone troposphérique sur huit heures est maintenu à 100 µg/m<sup>3</sup>. Mais une nouvelle recommandation est créée pour les « pics saisonniers » : l’OMS recommande de ne pas dépasser une concentration moyenne de 60 µg/m<sup>3</sup> (calculée à partir de la concentration moyenne quotidienne maximale sur huit heures au cours des six mois consécutifs durant lesquels la pollution est la plus élevée).

L’OMS crée aussi un nouveau seuil pour le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) qui voit son seuil relevé de 20 à 40 µg/m<sup>3</sup> sur vingt-quatre heures.

L’OMS prévient que « *le dépassement de ces nouveaux seuils relatifs à la qualité de l’air [est] associé à des risques importants pour la santé, tandis que le respect de ces seuils pourrait sauver des millions de vies* ». Aujourd’hui, rappelle-t-elle, l’exposition à la pollution atmosphérique entraîne sept millions de décès prématurés et la perte de millions d’années de vie en bonne santé chaque année (OMS, 2021).

**Tableau 1. 3. Seuils des différents polluants dans les deux références de l’OMS : 2005 et 2021**

(OMS, web, 22 septembre 2021, Communiqué de presse, Copenhague/Genève)

Polluant	Durée retenue pour le calcul des moyennes	Seuils de référence OMS 2005 (ref)	Seuils de référence OMS 2021 (ref)
PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Année	10	5
	24 heures <sup>a</sup>	25	15
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Année	20	15
	24 heures <sup>a</sup>	50	45
NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Année	40	10
	24 heures <sup>a</sup>	--	25
O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Pic saisonnier <sup>b</sup>	--	60
	8 heures <sup>a</sup>	100	100
SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24 heures <sup>a</sup>	20	40
CO (mg/m <sup>3</sup> )	24 heures <sup>a</sup>	--	4

Informations :

<sup>a</sup> 99<sup>ème</sup> percentile (3 à 4 jours de dépassement par an),

<sup>b</sup> Moyenne de la concentration moyenne journalière maximale d’O<sub>3</sub> sur 8 heures au cours des six mois consécutifs où la concentration moyenne d’O<sub>3</sub> a été la plus élevée.

### 1.4.8.3- La France s’aligne sur les recommandations de l’UE et de l’OMS

En France, les seuils réglementaires de la qualité de l'air ambiant sont définis dans l'article R. 221-1 du code de l'environnement. Ces seuils sont inspirés de la directive européenne 2008/50/EC qui est inspirée à son tour des lignes directrices de l'Organisation Mondiale de la Santé.

Une révision de la directive européenne devrait être adoptée d'ici fin 2023 ou début 2024, afin d'améliorer la législation globale de l'Union européenne en matière d'air pur. Le tableau 1.4 récapitule les seuils de la France concernant la qualité de l'air.:

**Tableau 1. 4. Récapitulatif des seuils d’information et de recommandation en vigueur en France**  
(ecologie.gouv.fr, web)

Polluant	Concentration	Période de moyenne
<b>Particules fines (PM<sub>2,5</sub>)</b>	25 µg/m <sup>3</sup>	1 an
<b>Particules (PM<sub>10</sub>)</b>	50 µg/m <sup>3</sup>	24 heures
<b>Dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)</b>	200 µg/m <sup>3</sup>	1 heure
<b>Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)</b>	300 µg/m <sup>3</sup>	1 heure
<b>Ozone</b>	180 µg/m <sup>3</sup>	Moyenne glissante sur 8 heures

### 1.4.8.4- La normes Tunisienne sur la protection de l’environnement

En Tunisie, la gestion de la qualité de l'air est régie par deux normes :

- **Norme tunisienne homologuée NT 106.04 (1994)** sur la « *protection de l'environnement : valeurs limites et valeurs guides pour certains polluants de l'air ambiant, en dehors des locaux de travail* » fixe les valeurs limites pour différents polluants dans l'air ambiant, notamment les particules en suspension dont les valeurs limites pour la santé publique ne doivent pas dépasser 80 µg /m<sup>3</sup> (Moyenne annuelle) et à 260 µg/m<sup>3</sup> (Moyenne journalière).

- **Décret n° 2010-2519** : fixe les valeurs limites générales des polluants de l'air émis par les sources fixes et la valeur limite de concentration de poussières des unités de production de bitume ou d'autres matériaux pour l'enrobage des routes à 50mg/m<sup>3</sup>.

- **Décret gouvernemental n° 2018-447 du 18 mai 2018**, fixant les valeurs limites et les seuils d'alerte de la qualité de l'air ambiant. Dans ce décret, les valeurs limites

et seuils d'alerte des polluants de l'air ambiant partent d'une moyenne à laquelle sont ajoutées chaque année une marge. A titre d'exemple, les moyennes horaires du NO<sub>2</sub> de départ est 200 µg/m<sup>3</sup> prises sur toute l'année avec 175 heures de dépassements autorisés par année. Cette valeur est applicable à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2021. Avant cette date cette valeur limite sera appliquée avec augmentation des marges de dépassement 100, 50, 30 et 0 respectivement pour les années 2018, 2019, 2020 et 2021 (Décret gouvernemental n° 2018-447 du 18 mai 2018, fixant les valeurs limites et les seuils d'alerte de la qualité de l'air ambiant, 2018).

Les principales valeurs mentionnées dans la réglementation tunisienne sont synthétisées dans le tableau 1.5 :

**Tableau 1. 5. Principales valeurs de la qualité de l'air dans la réglementation tunisienne**  
(Décret gouvernemental n° 2018-447 du 18 mai 2018, fixant les valeurs limites et les seuils d'alerte de la qualité de l'air ambiant)

Polluants	Type de moyenne	Autorisation de dépassement	Seuils de recommandation et d'information				Valeurs guides
			2018	2019	2020	2021	2021
NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup>	1h	175 h/an	300	250	230	200	
	1 an		130	100	70	40	
	3 h						400
SO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup>	1 h	24 h/an	440	410	380	350	
	1 j	3 j/an	200	175	155	125	
	3 h						500
PM <sub>10</sub> µg/m <sup>3</sup>	1 j		100	80	60	50	
	1 an		58	52	46	40	
	3 j						150
PM <sub>2,5</sub> µg/m <sup>3</sup>	1 j		60	50	40	35	
	1 an		25	23	21	20	
O <sub>3</sub> µg/m <sup>3</sup>	8 h	25 j/an	195	170	150	120	
	1 h						360
CO mg/m <sup>3</sup>	3 h		10				
	1 h		40				

## **CHAPITRE 2**

### **ZONE D'ÉTUDE, DONNEES ET METHODES**

Dans cette partie, on va mettre l'accent sur les caractéristiques géographiques de la zone d'étude qui ont un rôle dans la définition des types de temps, d'un côté, et celles qui ont des effets directs sur la répartition spatio-temporelle des concentrations des polluants atmosphériques étudiés, de l'autre (occupation du sol, climat, population, industrie, ...). Aussi, nous présentons les différentes données exploitées dans ce travail, ainsi que les traitements qui leurs sont appliqués.

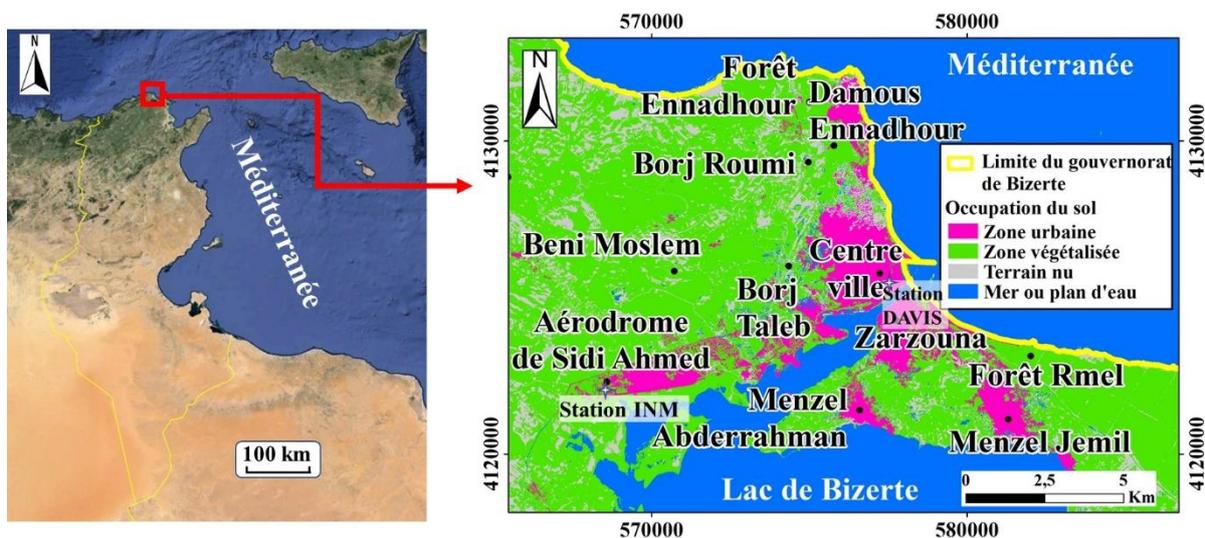
## 1- Milieu physique naturel

### 1.1- Situation géographique

L'agglomération de Bizerte appartient géographiquement au Gouvernorat portant le même nom et est située dans un milieu naturel très varié. Elle se caractérise par une étendue spatiale, un contraste topographique et un tissu urbain diversifié et complexe (Fig. 2.1). Ces conditions agissent fortement sur ses caractéristiques topoclimatiques et la répartition spatiale des polluants et de leurs concentrations.

Les zones végétalisées se trouvent globalement au niveau de la forêt d'Ennadhour au nord-ouest et celle de Rmel au sud. L'arrière-pays, dans la partie occidentale, est occupé par des terres agricoles (Fig. 2.1).

La station météorologique de l'INM se trouve dans l'aérodrome de Sidi Ahmed, à environ 9 km à l'ouest du centre-ville de Bizerte et de la Méditerranée. Les données de cette station ne sont pas représentatives du climat local de toute l'agglomération de Bizerte (Carrega, 1994).



**Figure 2. 1. Localisation et emprise urbaine de l'agglomération de Bizerte**

(SELLAMI *et al.*, 2023, Classification image Sentinel 2<sup>4</sup>)

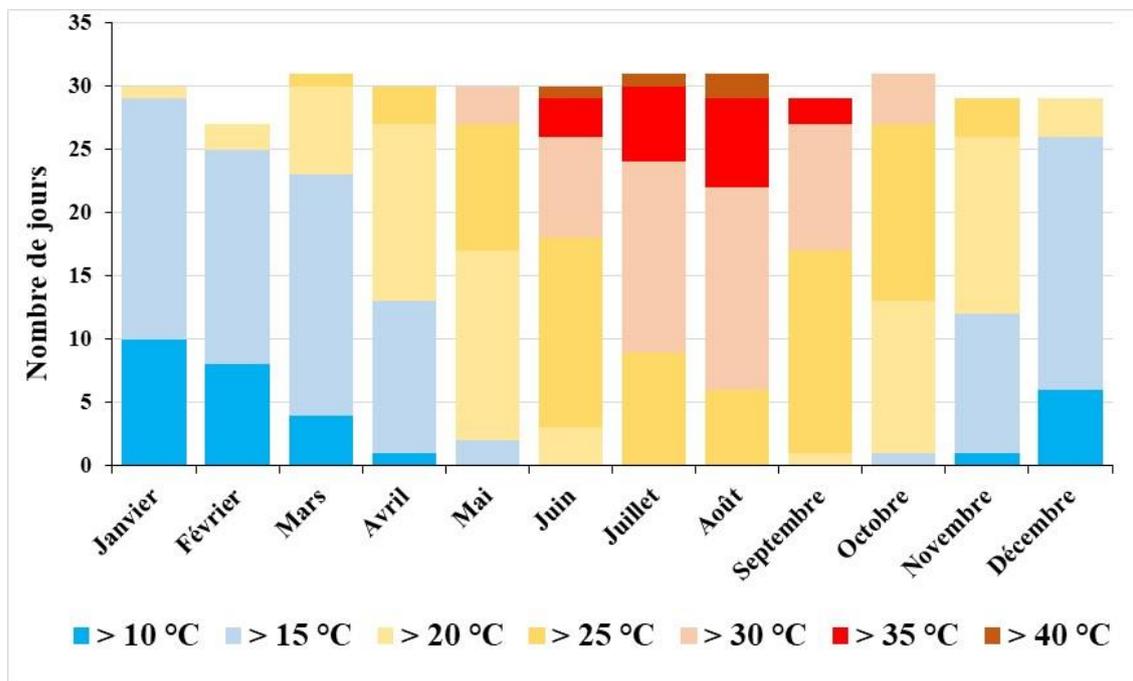
<sup>4</sup> Cette carte est une simplification du résultat d'une classification supervisée (en utilisant l'algorithme Random Forest) sur la base d'une image Sentinel 2A datée du 24/12/2020 prise à l'heure 12:41:19 à laquelle ont été ajoutés des indices spectraux (NDVI, NDW I, MNDW I, NDBI, BRI), rééchantillonnés tous à 10 m.

## 1.2- Le climat

Sur le plan climatique, c'est une région à climat méditerranéen assez homogène avec une influence continentale malgré la proximité de la mer.

### 1.2.1- Températures et précipitations moyennes

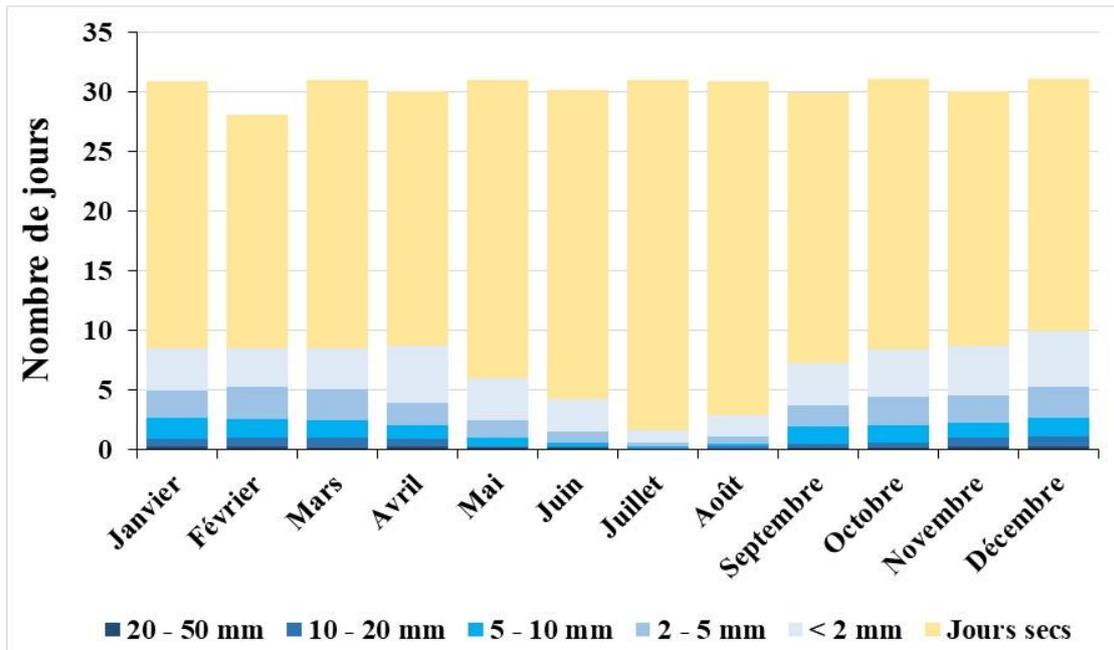
Les températures journalières maximales de l'air sont de 16°C en janvier et 33°C en août. Les températures journalières minimales correspondantes varient de 7°C en janvier à 21°C en août. Sur cette zone littorale nord, les variations de la température moyenne journalière sont marquées par un découpage saisonnier (Fig. 2.2).



**Figure 2. 2. Nombre de jours par classes de températures maximales et par mois à Bizerte**

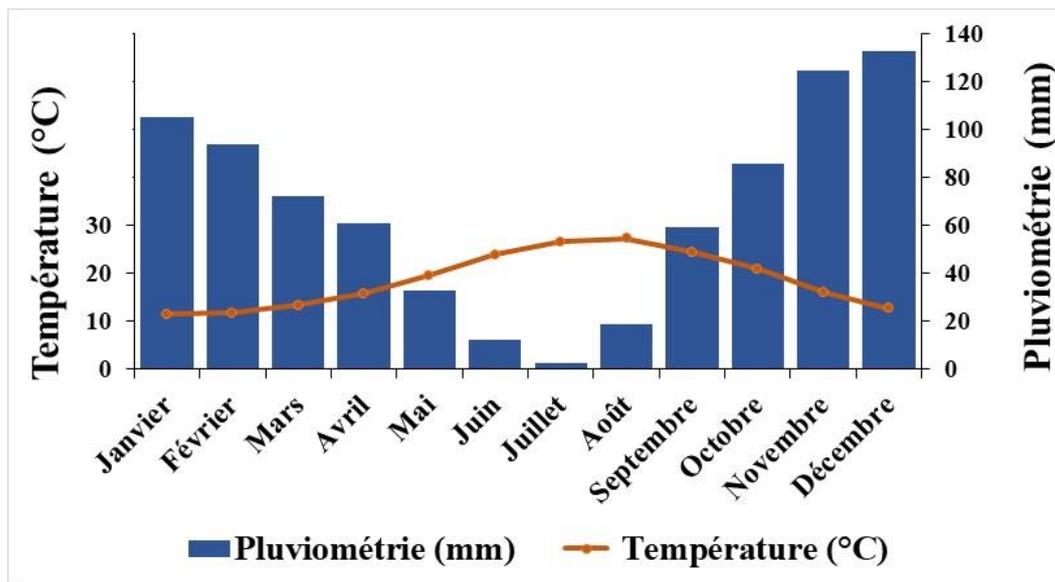
(Données INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA, période 1990-2022)

La saison des pluies se situe habituellement d'octobre à mars, mais elle peut s'étendre de septembre à mai. Le total pluviométrique annuel moyen s'élève à 641 mm et le nombre moyen de jours de pluie est de 110 jours (Fig. 2.3 et Fig. 2.4).



**Figure 2. 3. Nombre de jours de pluies par classes et par mois à Bizerte**

(Données INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA, période 1990-2022)

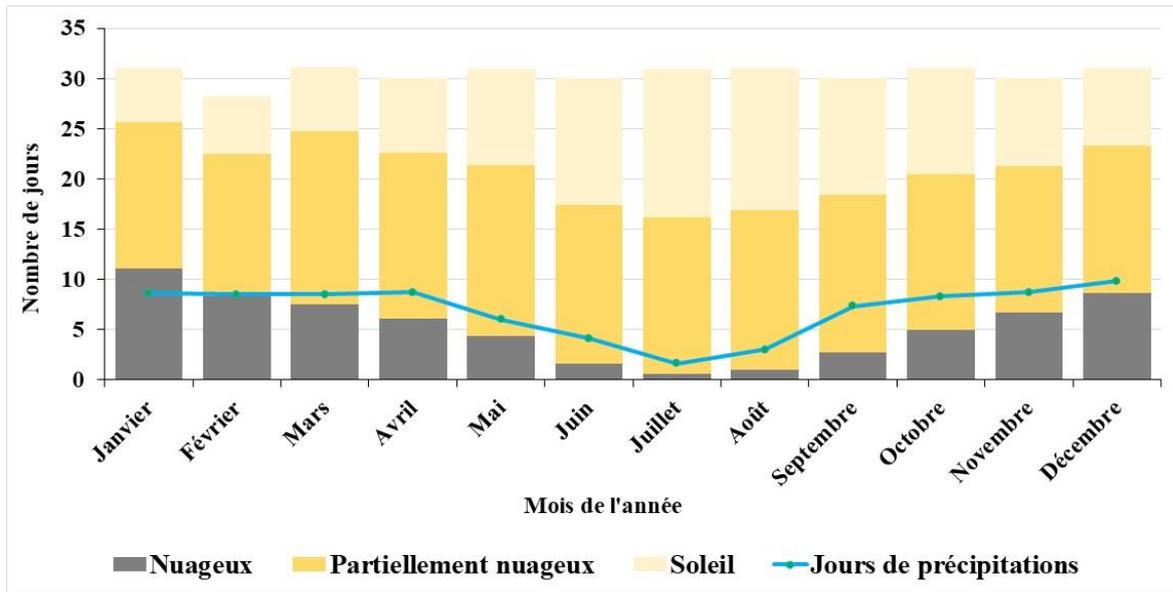


**Figure 2. 4. Diagramme ombrothermique de Bizerte**

(Données INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA, période 1990-2022)

### 1.2.2- Ciel nuageux, soleil et jours de précipitations

Pour ce qui est de l'état du ciel et en conséquence l'ensoleillement, fréquemment une bonne partie du ciel est couverte de nuage notamment pendant la saison humide. La région est dotée d'une forte durée d'ensoleillement (en moyenne 2900 heures par an) avec des différences significatives entre les saisons (Fig. 2.5). L'été, le temps est ensoleillé, voire partiellement couvert ; ce qui favorise les phénomènes météorologiques radiatifs et la pollution photochimique.

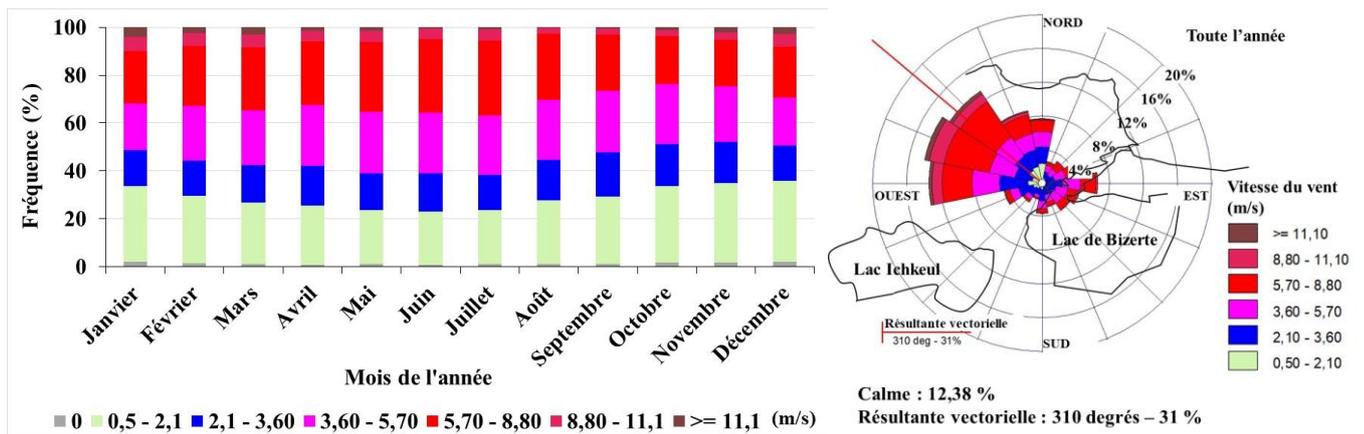


**Figure 2. 5. Ciel nuageux, soleil et jours de précipitations à Bizerte**

(Météo Bleu, web, 1985-2023)

### 1.2.3- Régime du vent

La vitesse moyenne du vent est généralement faible à modérée. Toutefois, on peut enregistrer pendant la saison hivernale (décembre, janvier et février) des vents forts dépassant 11 m/s. Les vents de cette classe ( $> 11$  m/s) représentent 3,1 %, 2 %, 0,6 % et 1,2 % respectivement pour l'hiver, le printemps, l'été et l'automne. Bizerte est une région parmi les plus ventées en Tunisie où le vent synoptique s'impose (Dahech *et al.*, 2012). D'après les enregistrements horaires, le pourcentage du calme ne dépasse pas 12,38 % en moyenne annuelle (Fig. 2.6).

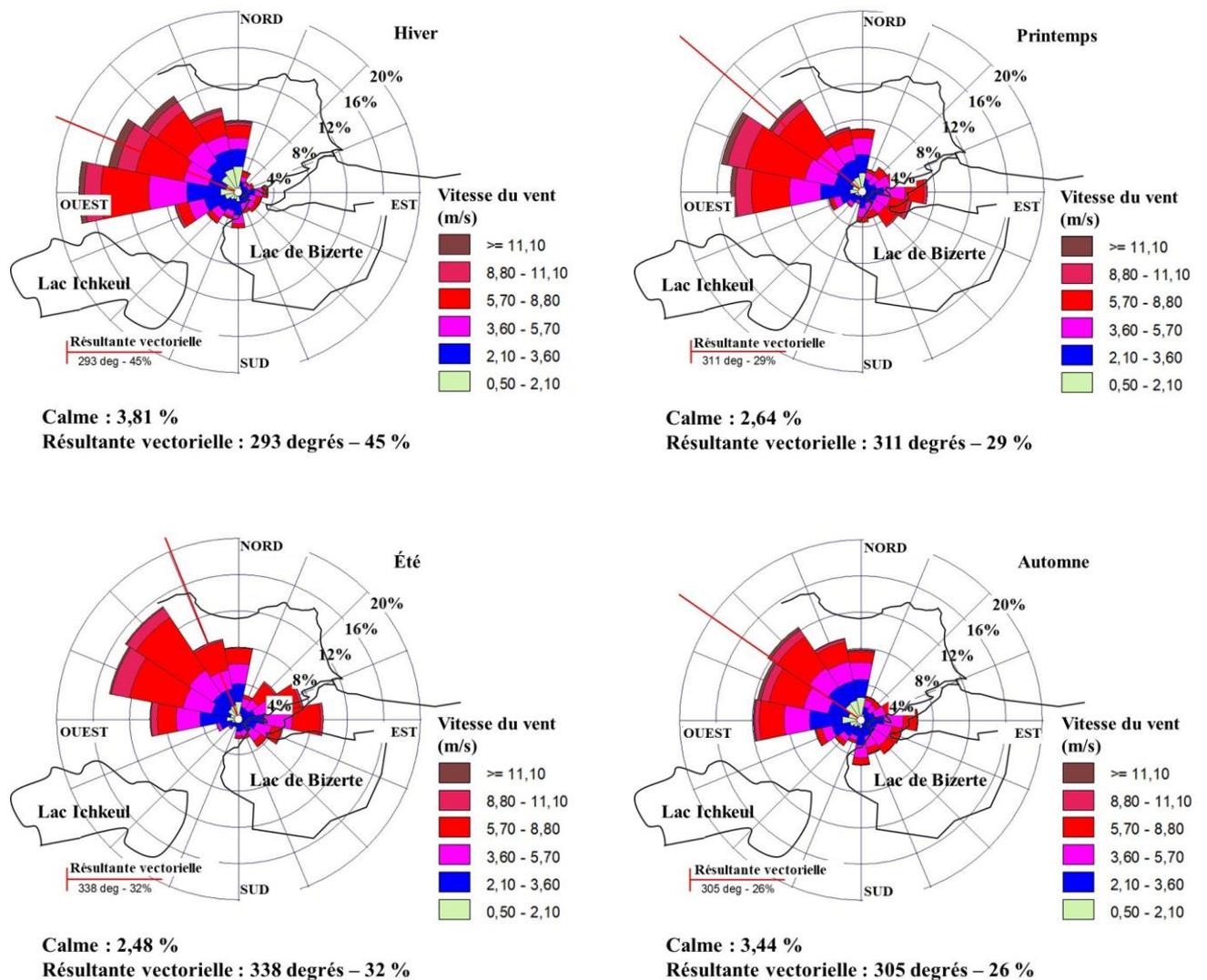


**Figure 2. 6. Fréquence des classes de vitesse du vent par mois et rose des vents annuels moyens à Bizerte**

(Données INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA, période 1990-2022)

Par saison, les roses de vent (Fig. 2.7) révèlent que le vent des composantes ouest et nord-ouest est très actif. Il représente 58,26 % des flux en hiver, 52 % au printemps, 49,52 en été et 45,14 % des flux en automne. Les vents du sud sont plus fréquents en automne. Ceux du nord conservent une fréquence peu variée de 8 %. Le changement d'ampleur est plus ressenti pour la composante est. Elle prend plus d'importance au printemps, en été et en automne avec l'influence de la brise de mer qui devient plus fréquente (Dahech et Charfi, 2017 ; Sellami *et al.*, 2022).

Par saison, c'est pendant l'hiver qu'on enregistre la fréquence de calme la plus importante (3,81 %), suivi par l'automne avec 3,44 % des jours de la saison, ensuite le printemps avec 2,64 % des jours (de la saison) et enfin l'été avec 2,48 % (Fig. 2.7).



**Figure 2. 7. Roses des vents en hiver (haut-gauche), au printemps (haut-droite), en été (bas-gauche) et en automne (bas-droite)**

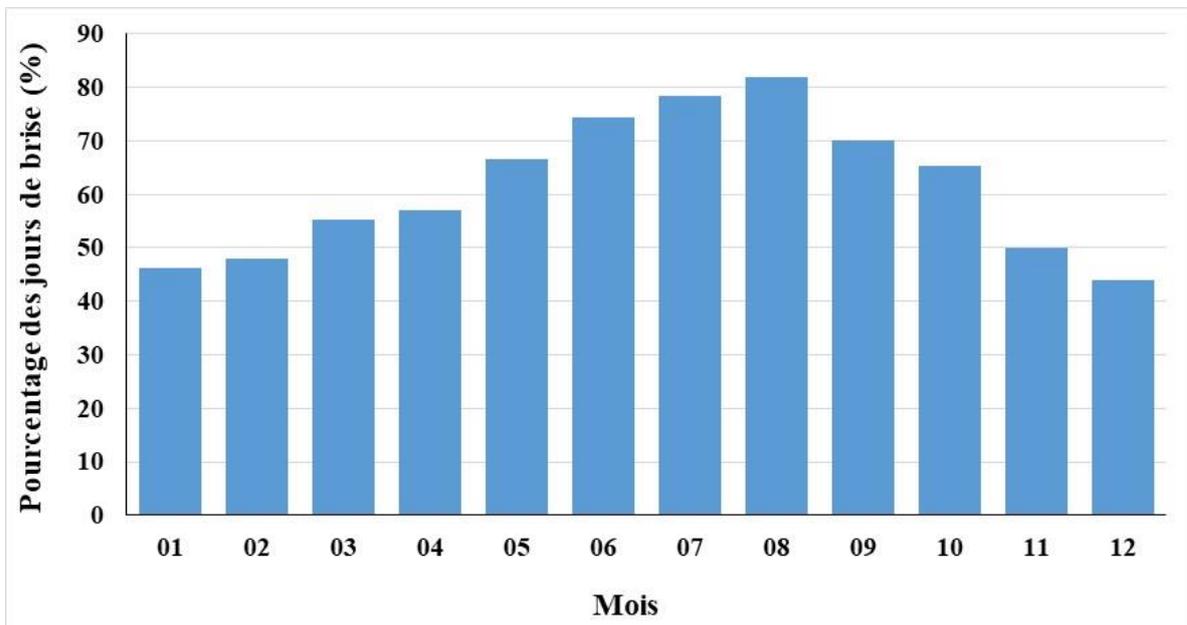
(Données INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA, période 1990-2022)

### 1.2.4- Régime des brises thermiques

La brise littorale est observée dans plus de deux tiers des journées en été à Bizerte. C'est un phénomène de « beau temps » car un vent synoptique fort brasse l'air et estomper les contrastes thermiques entre la mer et la terre.

A Bizerte, la situation de marais barométrique est plus fréquente en été (Dahech et Charfi, 2017). En hiver, sa fréquence est alors de l'ordre de 40-45%.

La figure 2.8 représente la fréquence mensuelle moyenne des jours de brise à Bizerte entre 1990 et 2022, en utilisant les filtres détaillés dans la partie méthode.



**Figure 2. 8. Fréquence mensuelle (%) des jours de brise**

(Données INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA, période 1990-2022)

### 1.3- Topographie

L'agglomération de Bizerte est caractérisée par trois groupes morphologiques : les dépressions, les hauteurs et les côtes. Une dégradation de plus en plus active est favorisée par le cadre morphostructurel, l'agressivité du climat, la faiblesse du couvert végétal (Fig. 2.9) et la pression humaine. Des liens étroits existent cependant entre ces différents paysages ce qui permet de les grouper dans trois principaux types de domaines : les hauteurs de l'intérieur, les dépressions (lac de Bizerte et lac d'Ichkeul) et plaines et la côte (Fig. 2.10). (PGES de Mateur, 2016, web).

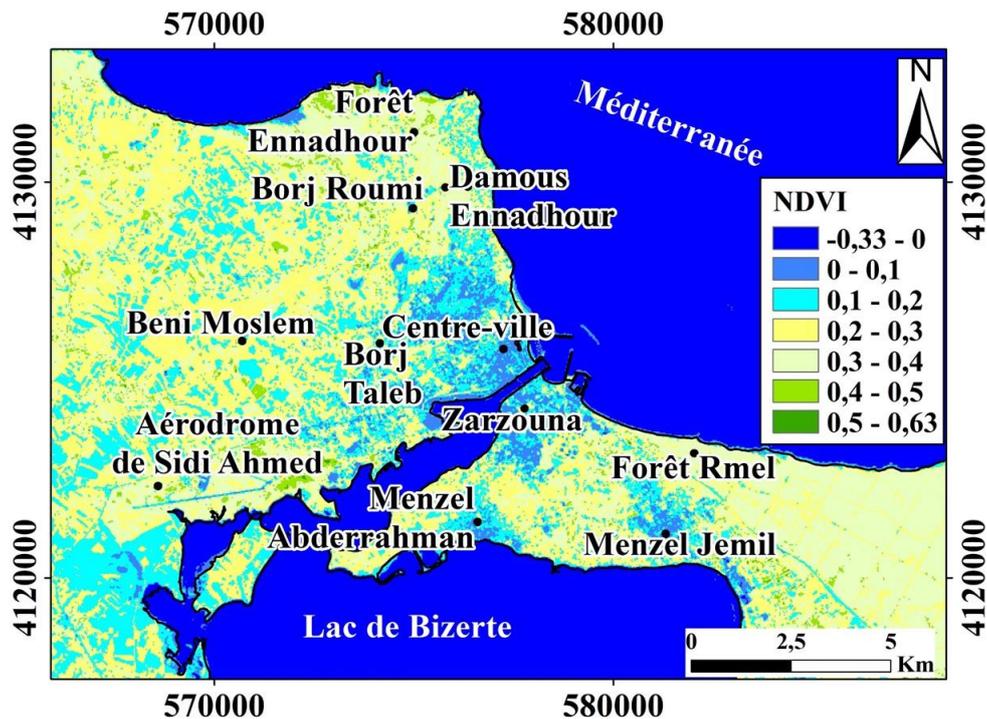


Figure 2. 9. Indice de végétation normalisé (NDVI) dans l'agglomération de Bizerte<sup>5</sup>  
(Landsat 8 OLI TIRS)

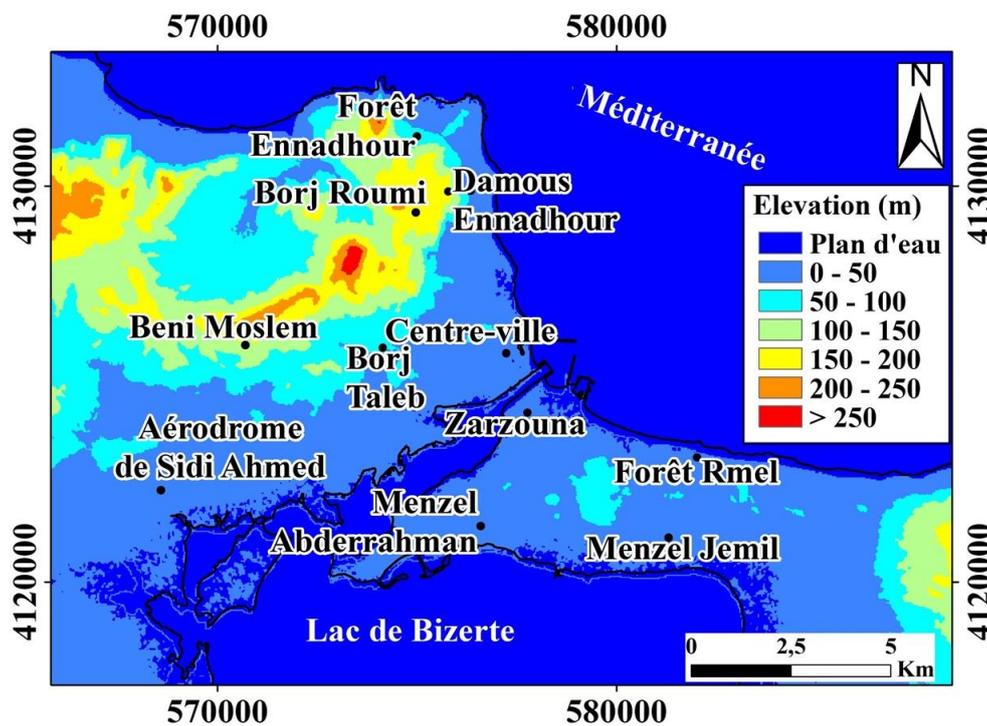


Figure 2. 10. Topographie de l'agglomération de Bizerte<sup>6</sup>  
(MNT SRTM à 30 m)

<sup>5</sup> Carte NDVI calculé en utilisant les bandes 4 et 5 de l'image Landsat 8 OLI TIRS du 30/07/2020 à 10h54 heure locale)

<sup>6</sup> Carte du relief issue d'un modèle numérique de terrain à 30m de résolution de SRTM

## 1.4- Milieu lagunaire

La dépression du lac de Bizerte présente une vaste nappe d'eau. Elle se caractérise par une forme cornue. Elle s'étend sur 15 km d'ouest en est et de 11 km du nord au sud. Elle est séparée de la Méditerranée (baie de Bizerte) par la presqu'île de Menzel Abderrahman qui culmine à 81 m. La lagune de Bizerte se caractérise par :

- Une température de 27 à 30 °C en période estivale. En moyenne la température des eaux du lac varie entre 10,7 °C en février et 27,8°C en août ;
- Une salinité qui oscille de 2,9 g/L pendant la période hivernale à 3,9 ‰ pendant la période estivale ;
- Une teneur en oxygène dissout varie entre 4,15 mg/l au mois d'août à 6,34 au mois de janvier ;
- Des teneurs en sels nutritifs ont été relativement plus faibles que ceux de la mer.

## 2- Cadre socio-économique

### 2.1- Population

L'agglomération abrite environ 350 000 habitants. La partie la plus peuplée correspond à la délégation de Bizerte Nord, notamment la partie centrale de la ville et une frange littorale, où la densité est de l'ordre de 1 600 habitants/km<sup>2</sup> (INS, 2014; Fig. 2.11).

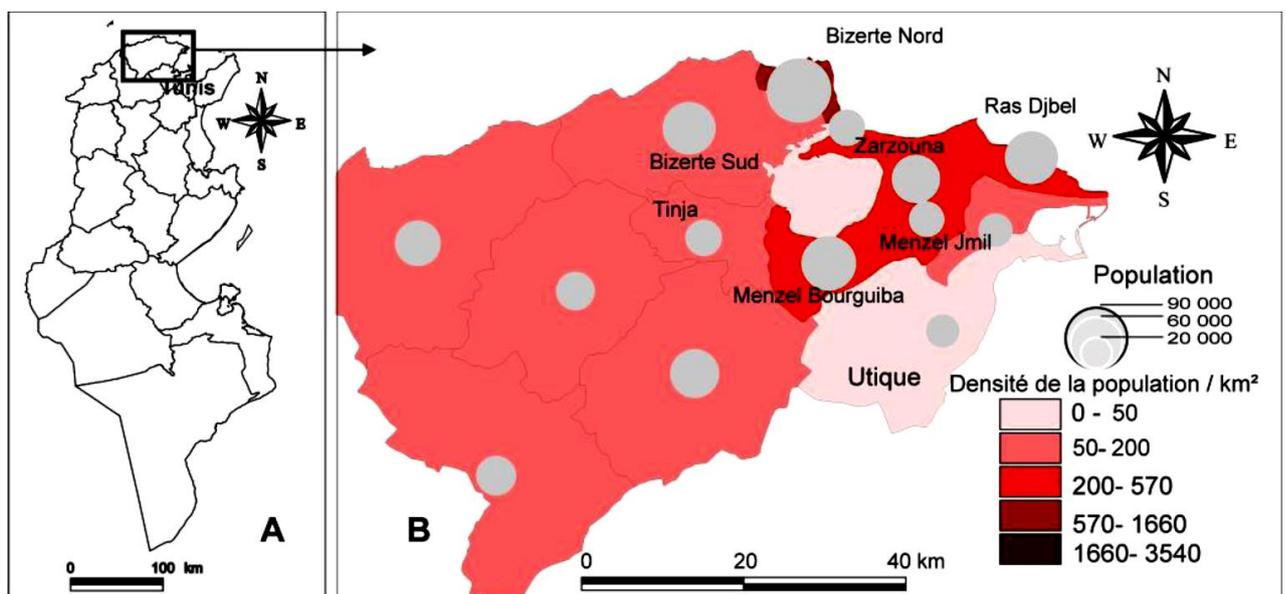
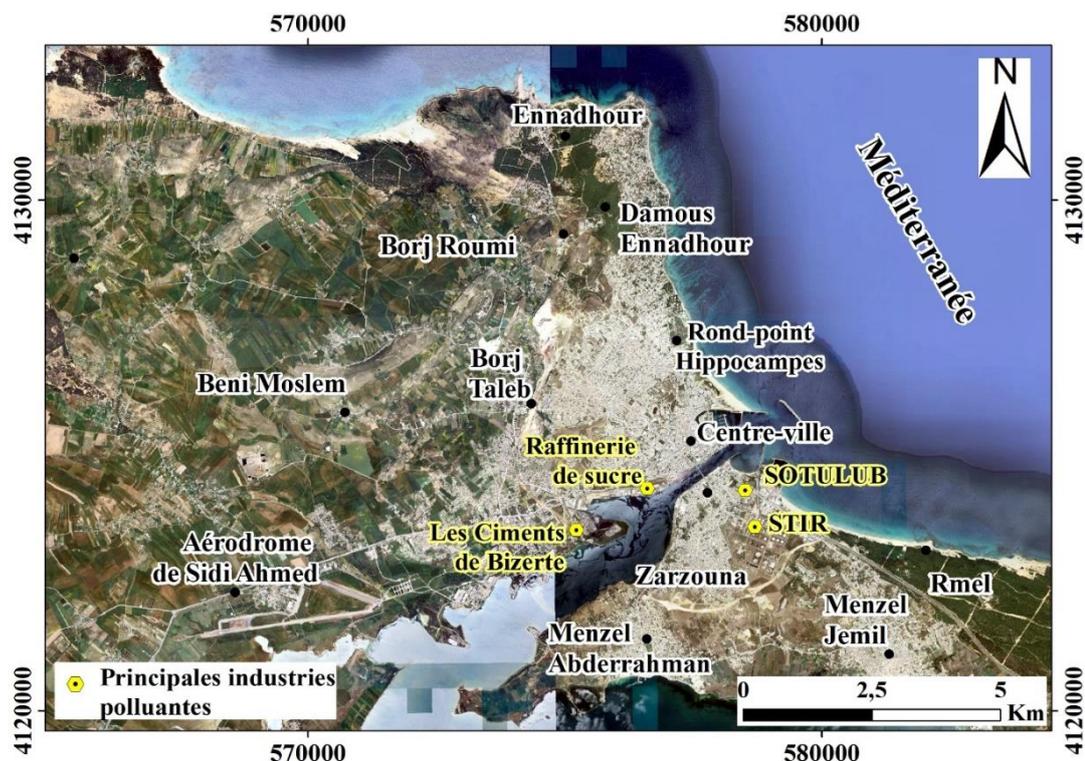


Figure 2. 11. Localisation et population à Bizerte

(Dahech et Charfi, 2017)

## 2.2- Activités industrielles :

L'agglomération de Bizerte est un des pôles les plus importants du pays, du fait de l'existence d'importantes industries lourdes telles que la sidérurgie (El Fouledh), la construction et la réparation navale (CMRT), la construction mécanique (SACEM), la raffinerie (STIR) et la cimenterie (SCB), Fig. 2.12). Le réseau des industries manufacturières est bien développé et diversifié dans l'agglomération de Bizerte (dont une partie importante destinée à l'exportation). Il est composé essentiellement des industries de textile et confection, cuir et chaussures et accessoires, mécanique, électrique et électronique, plaisance et accessoires, construction et réparation navale.



**Figure 2. 12. Installations industrielles (en jaune) dans l'agglomération de Bizerte**  
(Google Earth)

Les Installations industrielles dans le gouvernorat de Bizerte couvre  $67 \text{ km}^2$ . L'activité industrielle est concentrée principalement dans les zones suivantes :

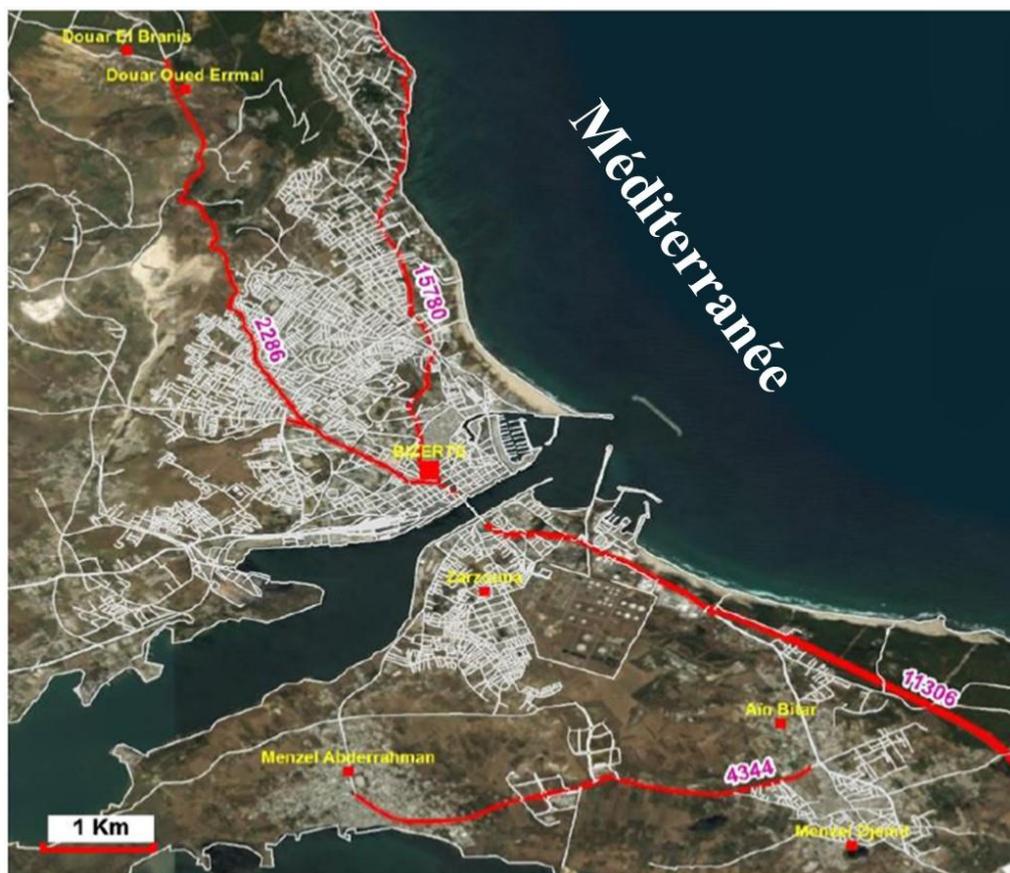
- La zone de Bizerte et ses environs ;
- La zone de Menzel Jemil Menzel Abderrahman Zarzouna ;
- La zone de Menzel Bourguiba ;
- La zone d'El Alia et Khétmine ;
- La zone d Utique ;

- La zone de Ras Jbel ;
- La Zone de Mateur.

### 2.3- Trafic routier

En se référant aux travaux de recensement du débit journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus réalisés en 2007 par la Direction Générale des Ponts et Chaussées (réalisation numérique « Direction de l'Exploitation et de l'Entretien Routier, Ministère de l'Equipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire), on peut distinguer quatre grands axes majeurs du trafic routier autour de la ville de Bizerte (Fig. 2.13):

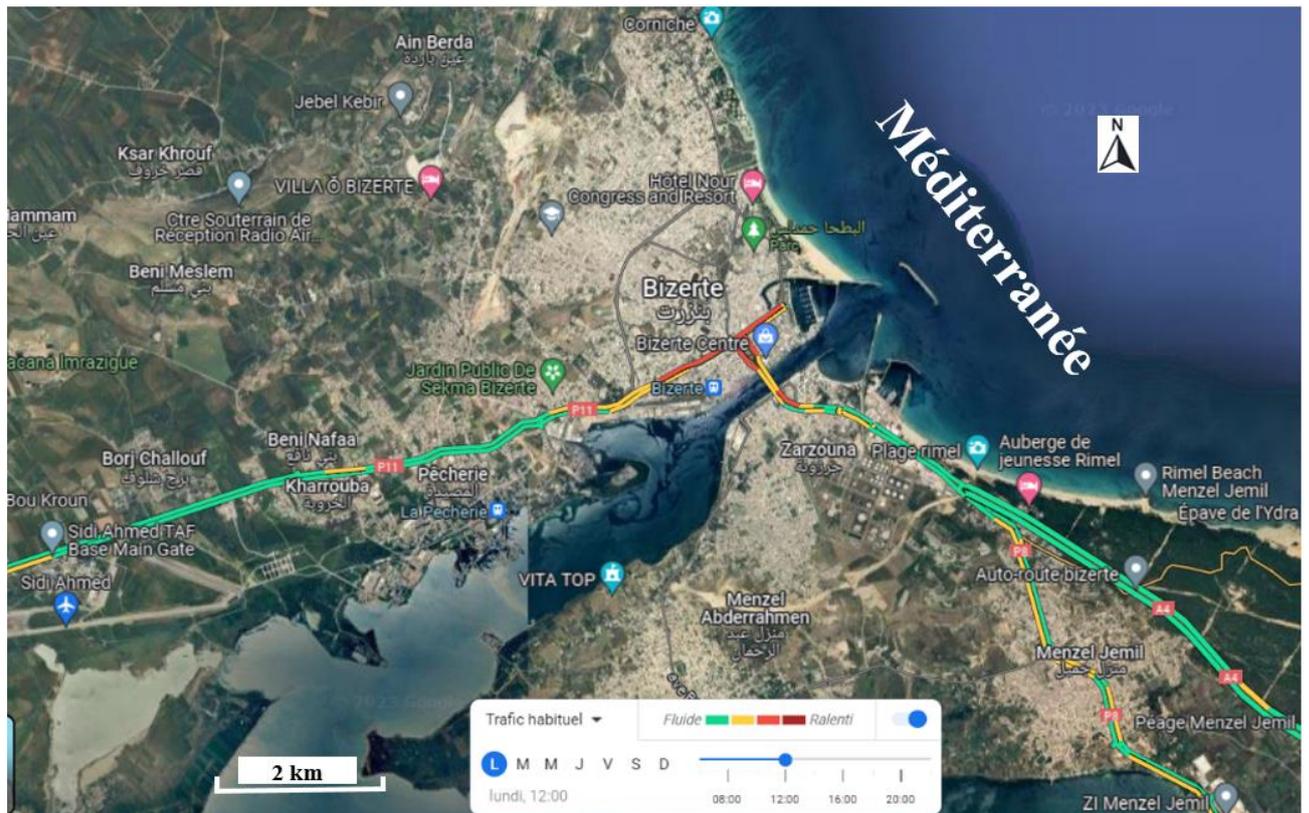
- 1- Axe El Alia-Zarzouna de l'autoroute A4 Tunis-Bizerte : 11 306 véhicules/jour
- 2- Axe Menzel Abderrahman-El Azib : 4 344 véhicules/jour
- 3- Axe Bizerte-Borj Erroumi : 15 780 véhicules/jour
- 4- Axe Bizerte vers le nord-ouest de la ville (Cimetière des Martyrs) : 2 286 véhicules/jour



**Figure 2. 13. Débit journalier moyen de la circulation motorisée des véhicules à deux essieux ou plus à Bizerte**

(Direction Générale des Ponts et Chaussées (réalisation numérique « Direction de l'Exploitation et de l'Entretien Routier, Ministère de l'Equipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire, 2007)

Les cartes issues de Google maps nous donnent une idée approximative de l'état de fluidité du trafic en temps réel et habituel (par jour de la semaine) par intervalle de 04 heures (Fig. 2.14).



**Figure 2. 14. Fluidité du trafic habituel par intervalle de 04 heures (exemple pris pour un lundi à 12h)**  
(Google maps)

Le comptage des véhicules a révélé que le centre-ville et la corniche sont très fréquentés. Le pont reliant le sud au nord de l'agglomération enregistre avec les grands axes routiers le plus grand nombre de véhicules (Fig. 2.15 - Fig. 2.17).

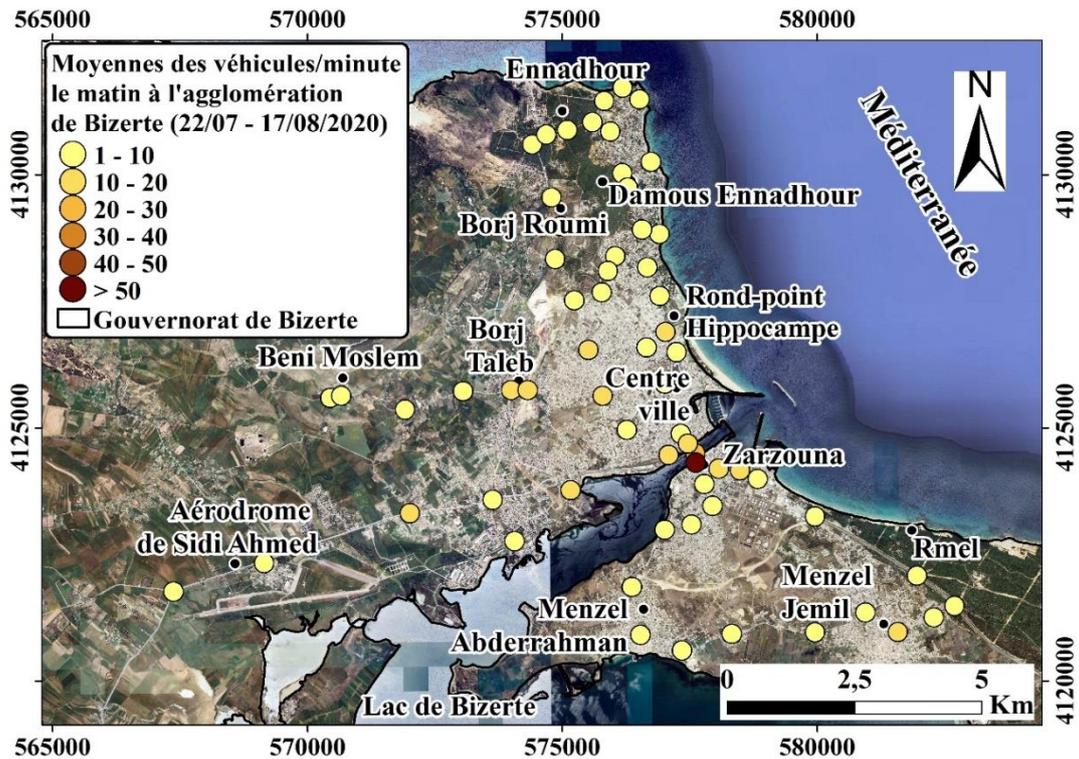


Figure 2. 15. Carte des moyennes de véhicules/minute circulant durant le pic matinal du trafic routier en été dans l'agglomération de Bizerte  
(Comptage personnel pendant l'été 2020)

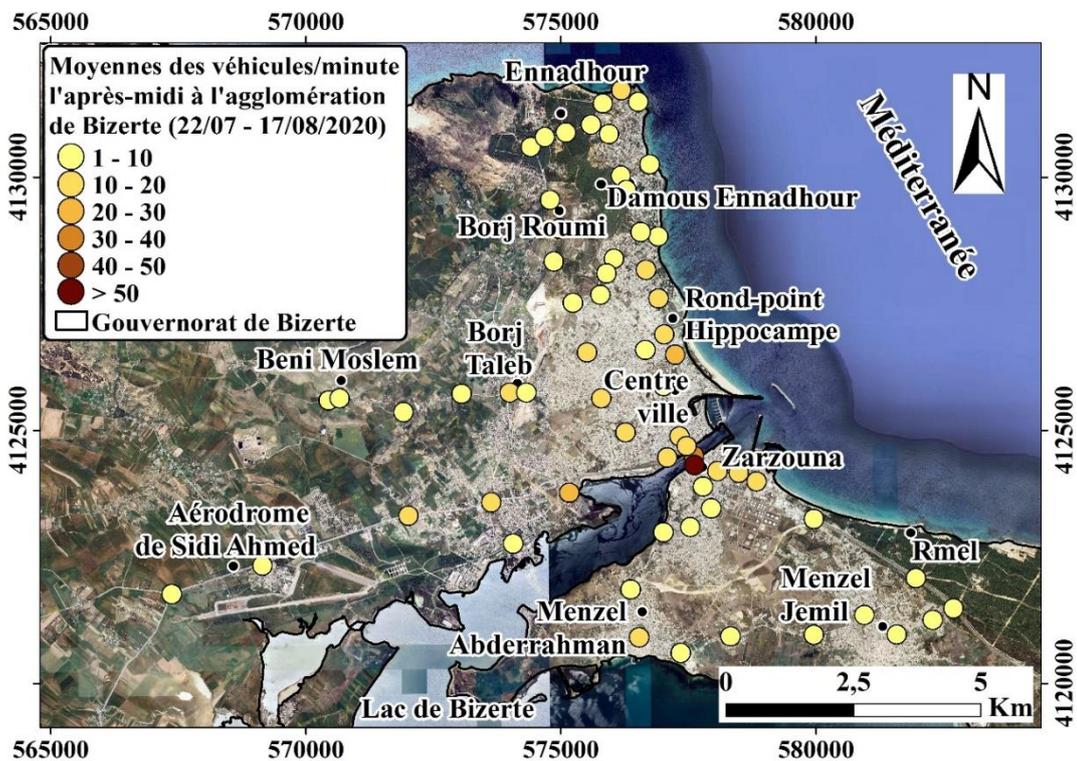
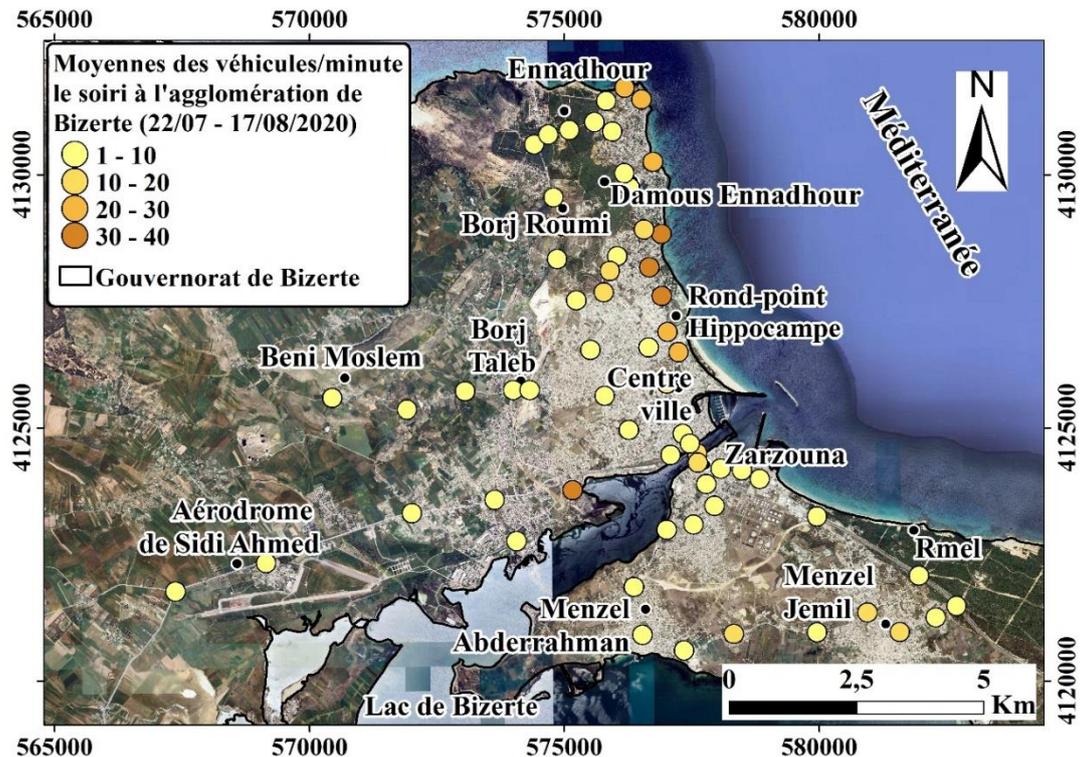


Figure 2. 16. Carte des moyennes de véhicules/minute circulant l'après-midi en été dans l'agglomération de Bizerte  
(Comptage personnel pendant l'été 2020)



**Figure 2. 17. Carte des moyennes de véhicules/minute circulant le soir en été dans l'agglomération de Bizerte**

(Comptage personnel pendant l'été 2020)

### 3- Matériels et méthodes :

#### 3.1- Dispositif de surveillance de la pollution atmosphérique à Bizerte

L'ANPE dispose de plusieurs stations fixes pour le contrôle et la surveillance de la qualité de l'air dans les endroits jugés exposés à une pollution atmosphérique (Bizerte, Bab Saadoun, Ben Arous, Radès, Gabès, Sfax...) qui sont toutes raccordées au poste central installé au super site de l'ANPE (au parc El Mourouj). En plus, le laboratoire mobile (camion laboratoire) permet des interventions souples et rapides pour estimer la qualité de l'air dans les zones non équipées de stations fixes. La station de Bizerte est installée au centre-ville et est classé comme station urbaine (Kchih, 2007).

#### 3.2- Représentativité du site de la station ANPE à Bizerte

La station de mesure des polluants atmosphériques (Fig. 2.18) est classée comme urbaine. Elle est installée dans l'espace de la municipalité. Les mesures sont principalement influencées par les activités résidentielles, routières et industrielles.

Généralement, le choix du site était basé essentiellement sur :

- La densité de la population
- Les conditions climatiques (Vent, Température, Humidité ...)

- La localisation des unités industrielles polluantes
- Le plan de circulation et du trafic automobile



**Figure 2. 18. Station fixe de surveillance de la qualité de l'air à Bizerte**  
(Site ANPE)

Selon les aires de représentativité des différentes classes des stations de suivi de la qualité de l'air (Source ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, Direction de l'Air et des Transports), la station de mesure de l'ozone troposphérique de Bizerte est classée dans la catégorie « Stations de fond réalisant un suivi de l'exposition moyenne des personnes et de l'environnement », et sous-catégorie « Urbaine ». Selon ADEME, son aire de représentativité s'étale de 100 m à 2 km.

En se basant sur ces seuls critères, le site de la surveillance de la qualité de l'air à Bizerte ainsi que celui pour la mesure de l'ozone semblent être peu représentatif de point de vue couverture spatiale puisque la station la plus proche est celle de l'Ariana distante (à vol d'oiseau de presque de 54 km).

En pratique, les valeurs des aires de représentativité vont dépendre de chaque situation topographique, ainsi que de la variabilité locale des émissions, des régimes météorologiques et du polluant considéré.

Un autre critère est évoqué dans le rapport de ADEME qui est la prise en compte de l'environnement immédiat du point de prélèvement où « *il est important d'assurer la meilleure représentativité possible du prélèvement en évitant, dans la mesure du possible, la présence d'obstacles (arbres, clôtures, édifices...)*. 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'ozone ».* (ADEME, 2002). La station de l'ANPE à Bizerte est implantée juste à côté d'un palmier ce qui est contradictoire avec les exigences mentionnées dans le rapport d'ADEME.

### **3.3- Caractéristiques de la station ANPE à Bizerte**

Toutes les stations utilisent des instruments standard de mesure des NO<sub>x</sub> (NO et NO<sub>2</sub>), PM<sub>10</sub>, CO et SO<sub>2</sub> conçus par Teledyne Advanced Pollution Instrumentation Company. Les techniques de traitement des données et les méthodes standards sont décrites dans les manuels d'instructions de l'analyseur. Les modèles Teledyne utilisés sont 200A, 400A et 100A pour NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> et SO<sub>2</sub>, respectivement.

La détection des molécules d'ozone est basée sur l'absorption de la lumière UV dans la longueur d'onde 254 nm due à une résonance électronique interne de la molécule O<sub>3</sub>. L'équation de Beer-Lambert calcule la concentration d'ozone à partir du rapport des intensités lumineuses<sup>7</sup>.

L'analyseur SO<sub>2</sub> est basé sur la technologie de la mesure de la fluorescence de SO<sub>2</sub> due à l'absorption de l'énergie UV. Le dioxyde de soufre absorbe dans la région de 190 nm-230 nm. La lampe UV émet des rayons ultraviolets et passe par un filtre passe-bande de 214 nm, excite les molécules de SO<sub>2</sub>, produisant de la fluorescence. Le rayonnement fluorescent est directement proportionnel à la concentration de SO<sub>2</sub>.

Les niveaux de PM<sub>10</sub> sont calculés au moyen de moniteurs automatiques d'atténuation des rayonnements bêta.

Aussi, toutes les stations sont équipées d'une station météo automatique.

Le laboratoire (ou station) mobile (Fig. 2.19) est équipé pour l'analyse des polluants classiques (O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> et PS) et pour la mesure des paramètres météorologiques (Température, hygrométrie, vitesse et direction de vent).

---

<sup>7</sup> **Loi de Lambert** : La proportion de lumière incidente absorbée par un milieu transparent est indépendante de l'intensité de la lumière (pourvu qu'il n'y ait pas d'autres changements physiques ou chimiques dans le milieu).

**Loi de Beer** : L'absorption de la lumière est directement proportionnelle à la fois à la concentration du milieu absorbant et à l'épaisseur de la cuve où se trouve le milieu.

Une combinaison de ces deux lois (la loi de **Beer-Lambert**) donne la relation entre l'absorbance (A) et la transmittance (T). Il est important de noter que la loi de Beer-Lambert est seulement vraie en lumière monochromatique.



**Figure 2. 19. Le laboratoire (ou station) mobile de suivi de la qualité de l'air de l'ANPE**  
(ANPE, web)

### **3.4- Description des données**

#### **3.4.1- Données de l'ozone de la station ANPE durant la période 2010-2015**

Il s'agit des enregistrements horaires d'ozone ( $O_3$ ) recueillis par la station fixe de l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement (ANPE). Elle est située à 1,5 Km de la raffinerie de Zarzouna au sud-est, à 0,8 Km du parc Belvédère au Nord, à 2 Km de la cimenterie de Bizerte au Sud-ouest et à 700 m de la mer.

Les données acquises s'étalent sur une période de 6 ans (2010-2015). Elles sont parfois très lacunaires. Pour cette raison, on n'a pas pu retenir que les deux années 2011 et 2012. Pour la même raison, certains axes de recherche n'ont pas pu être développés.

La qualité des données a été vérifiée avant d'être exploitée. En effet, les données manquantes n'ont pas été remplacées mais leurs répartitions aux différentes échelles temporelles ont été vérifiées. Aussi, la cohérence entre les paramètres météorologiques et les données de pollution a été examinée.

Avec une seule station urbaine de mesure de l'ozone troposphérique à Bizerte, les données qui en découlent ne peuvent pas être suffisantes pour interpréter et analyser efficacement la situation dans un espace aussi large et contrasté que celui de l'agglomération de Bizerte et de son milieu d'influence par les polluants.

De point de vue méthodologique, un réseau dense de stations permettra non seulement de couvrir un espace plus large et une cartographie plus fine, mais aussi, au cas les données qui en découlent vont alimenter un modèle, de cartographier sur une échelle spatio-temporelle les degrés de concentration de l'ozone. Or, ceci fait face souvent à des limites techniques, mais

surtout financières ce qui amène les chercheurs à procéder par (1) des mesures itinérantes, ou bien (2) une modélisation ou encore (3) les deux ensembles.

### 3.4.2- Données des concentrations d’ozone troposphérique de la campagne de l’été 2020

Il s’agit d’une campagne de mesures semi-itinérantes mobiles à l’aide d’un capteur Aéroqual 500<sup>8</sup> effectuée du 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020 et ce sur trois périodes de la journée : le matin de 06h à 07h, l’après-midi de 16h à 18h et le soir de 00h à 01h. Les mesures sont effectuées sur 65 sites, pour un total de 1290 mesures réalisées (Fig. 2.20). Chaque point de mesure a bénéficié d’au moins 6-7 itérations par période de la journée.

Les données annexes enregistrées simultanément avec les concentrations d’ozone sont :

- Direction et vitesse du vent
- Humidité relative
- Nombre de véhicules (camions, voitures, motos)
- Fluidité du trafic routier
- Activité globale du site
- Nombre de personnes présents sur le site et son environnement proche par tranche d’âge



**Figure 2. 20. Circuit et fiches des mesures semi-itinérantes effectuées 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020**  
(Google Earth, cliché personnel)

<sup>8</sup> Les enregistrements du capteur Aéroqual 500 sont comparables à ceux des stations fixes de référence relevés à Edinburgh, Royaume-Uni, (Lin C. *et al*, 2015).

### 3.4.3- Données de la campagne de l'été 2021

Une deuxième campagne de mesure couvrant la période du 15 au 21 août 2021 de différents polluants (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>, ainsi que quelques paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité relative et la température du point de rosée) est réalisée sur un itinéraire qui commence des hauteurs d'Ennadhour (Forêt) et suit le couloir topographique qui mène jusqu'à la limite nord-ouest de l'agglomération de Bizerte, puis au centre-ville pour qu'on longe ensuite la corniche pour atteindre la pointe NE de la côte. Au niveau de Bizerte Sud, on a pris quelques points de mesure en relation avec les résultats de la campagne de l'été 2020. Ces mesures sont réalisées sur trois périodes de la journée : le matin, au début de l'après-midi et à la fin de l'après-midi. Au total, 192 mesures sont effectuées (Fig. 2.21).

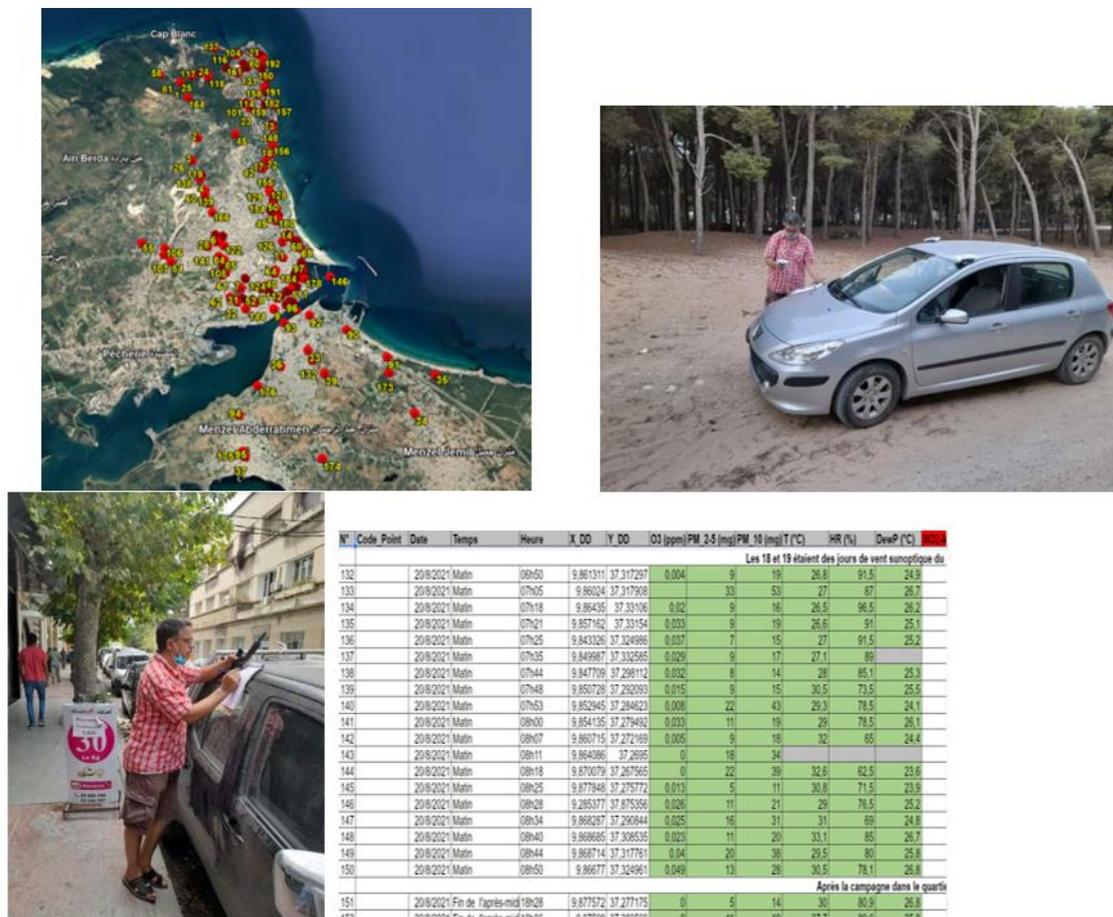
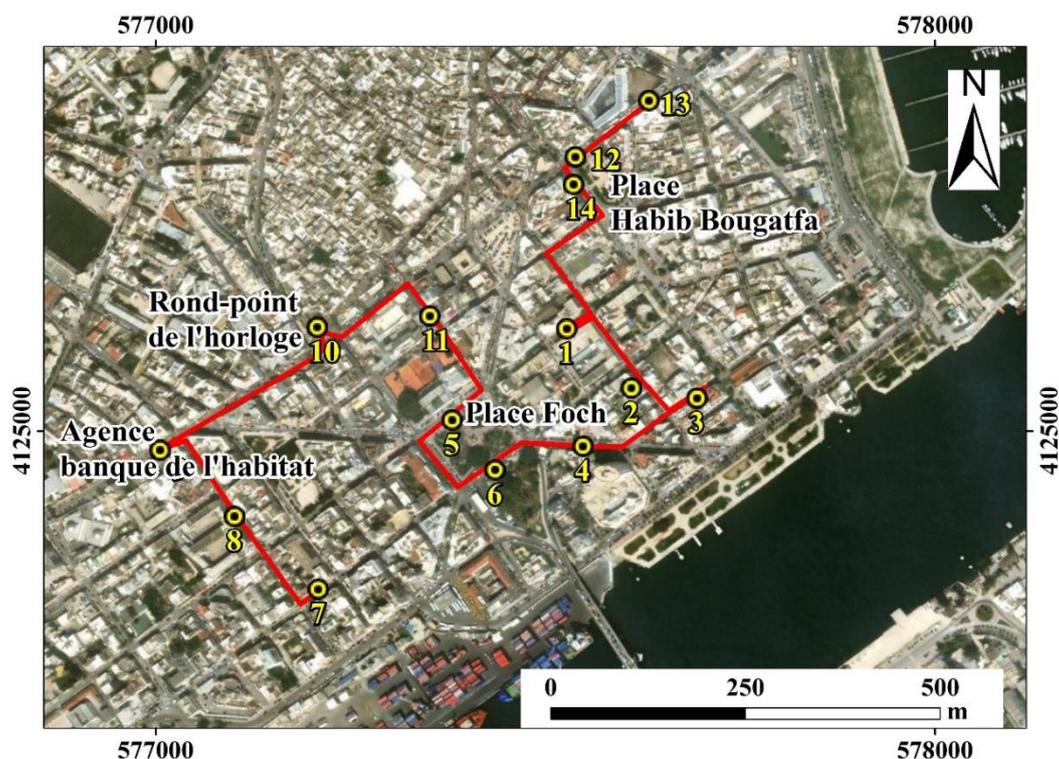


Figure 2. 21. Circuit et fiches des mesures semi-itinérantes effectuées du 15 au 21 août 2021

(Google Earth, clichés personnel et de CHARFI S.)

Dans une deuxième étape (19-21/08/2021) et à une échelle plus fine (locale), on a effectué des mesures des mêmes paramètres (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>, ainsi que la température, l'humidité relative et la température de point de rosée) dans le quartier européen tout en prenant

en considération la représentativité des points de mesures par rapport à l'orientation géographique et à la brise. Au total, 70 mesures sont effectuées (Fig. 2.22).

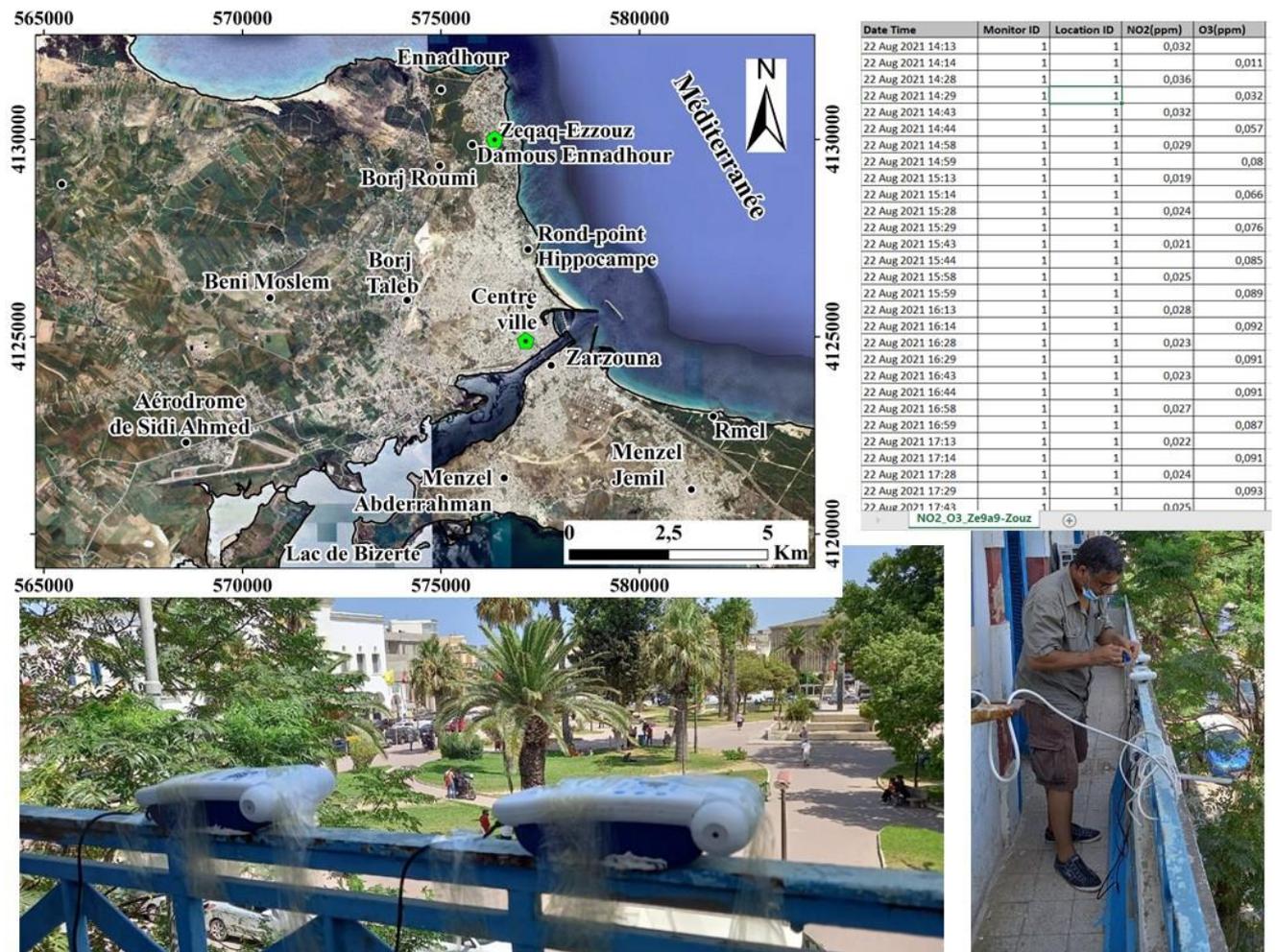


**Figure 2. 22. Circuit des mesures semi-itinérantes effectuées du 19 au 21 août 2021 dans le quartier européen**

(Google Earth, campagne de terrain)

A une troisième étape, deux capteurs  $O_3$  et  $NO_2$  sont installés (en tant que stations fixes enregistrant les données chaque 30 mn) durant la période du 22/08 au 07/09 de l'année 2021. Le premier au nord de l'agglomération dans un quartier résidentiel se trouvant entre les hauteurs et la forêt à l'ouest et la mer à l'est. Le deuxième est installé au centre-ville (Place Foch<sup>9</sup>). Au total, 2950 mesures sont effectuées (Fig. 2.23).

<sup>9</sup> Son nouveau nom est « Place de Palestine » (<https://www.commune-bizerte.gov.tn/>)



**Figure 2. 23. Installation des capteurs mobiles O<sub>3</sub> et NO<sub>2</sub> en tant que stations fixes**  
(Google Earth, cliché personnel., campagne de terrain)

### 3.4.4- Données de la campagne du printemps 2022

Cette campagne de mesures semi-itinérantes s'est étalée du 03 au 05 mai 2022 dans le but de mesurer les polluants (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub>), notamment l'ozone troposphérique, durant le début de la saison photochimique.

### 3.4.5- Données de la campagne de l'été 2022 et l'été 2023

Les mesures en continu du NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> et SO<sub>2</sub> sont issues de trois capteurs couvrant la période allant du 26/03/2022 au 29/08/2023 (avec des périodes de couverture qui diffèrent selon le capteur). Ces capteurs fixes sont installés au siège du centre de formation InfoPlus avec une vue sur la place Foch du côté ouest (l'aspirateur du capteur est orienté vers l'est, la mer). Ils sont configurés pour prendre une mesure chaque 30 mn (pour des raisons de capacité de mémoire de stockage).

Les mesures semi-itinérantes dans l'agglomération de Bizerte et dans le quartier européen couvrent la période du 15/08/2022 au 21/08/2022. Il s'agit des mesures de la concentration du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et des particules fines (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>).

#### **3.4.6- Données du laboratoire mobile (camion laboratoire) de l'ANPE**

Outre les données ci-dessus mentionnées, nous avons pu acquérir, de la part de l'ANPE, les résultats d'une campagne de mesure réalisée du 11/05/2004 à 07/06/2004 sur quatre sites, moyennant un laboratoire mobile<sup>10</sup>. Les sites où sont mesurés les polluants sont les suivants :

- L'usine de SOTULUB à Zarzouna
- L'agence Tunisie Télécom à Aïn Meriem à Bizerte Nord
- La pêcherie près du dispensaire militaire à Bizerte sud
- L'école primaire Oum Hani<sup>11</sup> à Menzel Bourguiba

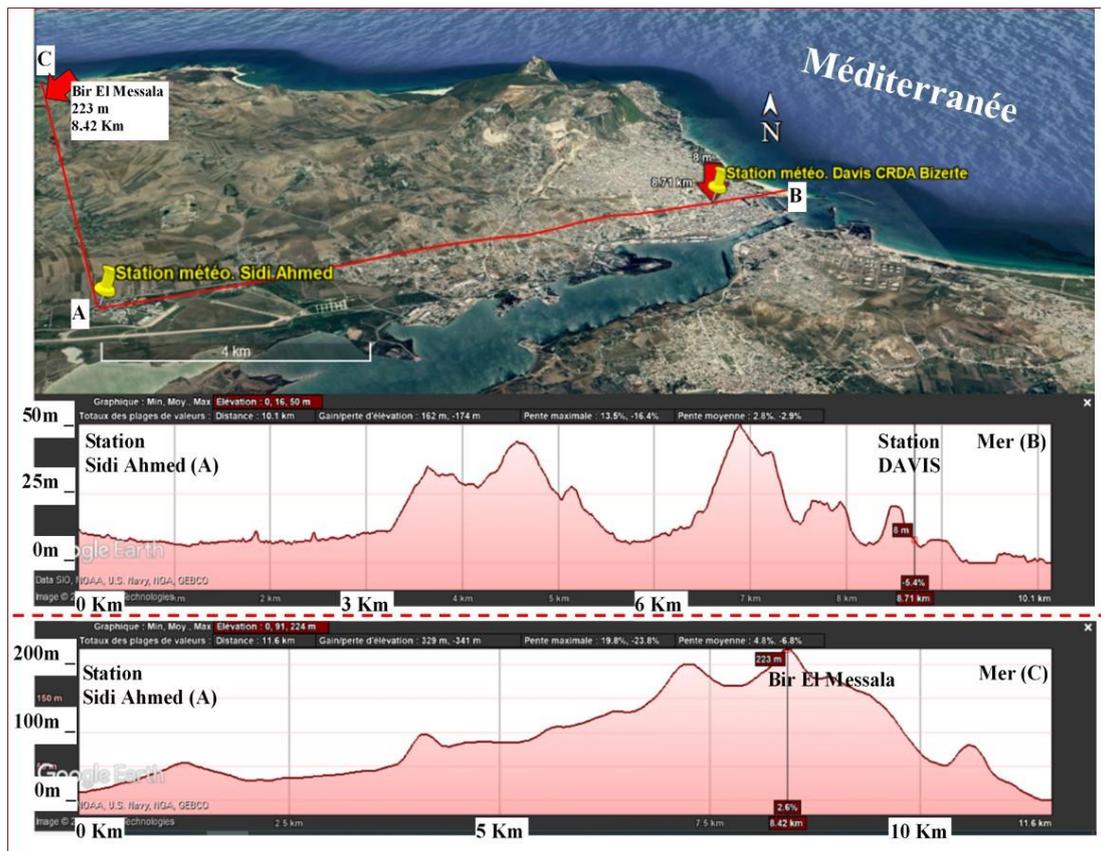
#### **3.4.7- Données météorologiques de la station synoptique :**

Il s'agit notamment de mesures météorologiques de la station à l'aérodrome de Sidi Ahmed appartenant au réseau de l'Institut Nationale de la Météorologie (Fig. 2.24 - Fig. 2.26) : essentiellement celles à fréquences horaires et quotidiennes. Ce sont des Données INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA couvrant la période 1990-2022. Nous avons eu recours aussi aux données de cette station archivées sur le site d'Infoclimat.

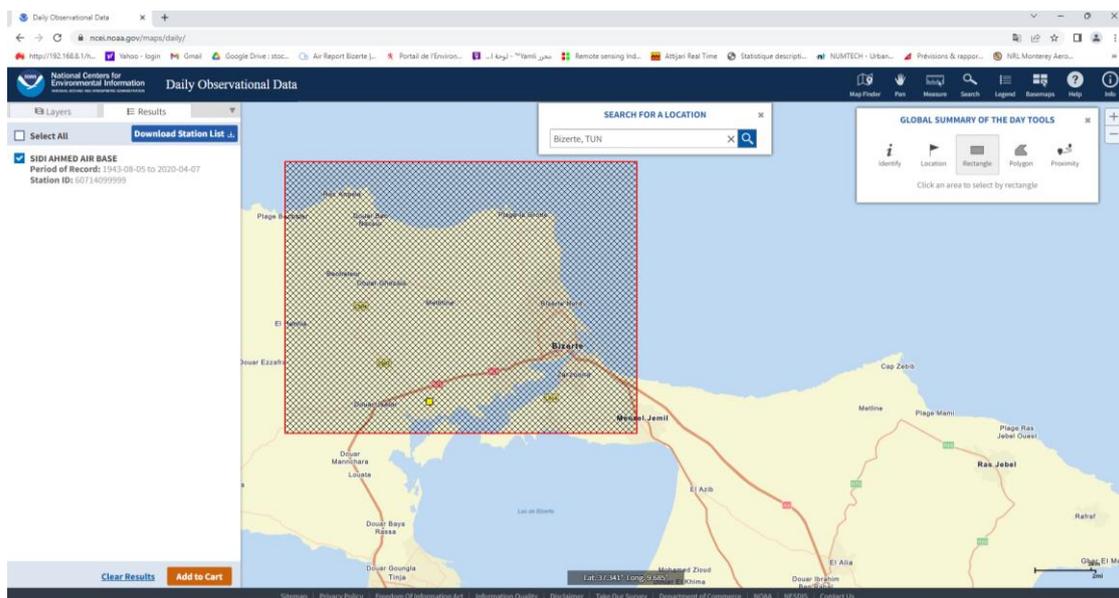
---

<sup>10</sup> L'objectif de cette campagne est de mesurer des concentrations des polluants de l'air sur tous les périphériques du centre-ville. Par ailleurs dans chaque zone sélectionnée, une étude de faisabilité était réalisée en se basant sur l'examen détaillé de la carte routière de la région, ainsi que la possibilité de l'installation du camion dans un site assuré (telles que, les parcs des municipalités, les écoles primaires, les hôpitaux...) et ceci pour garantir l'alimentation en continu (24h sur 24h) par le courant électrique et d'assurer la sécurité du laboratoire.

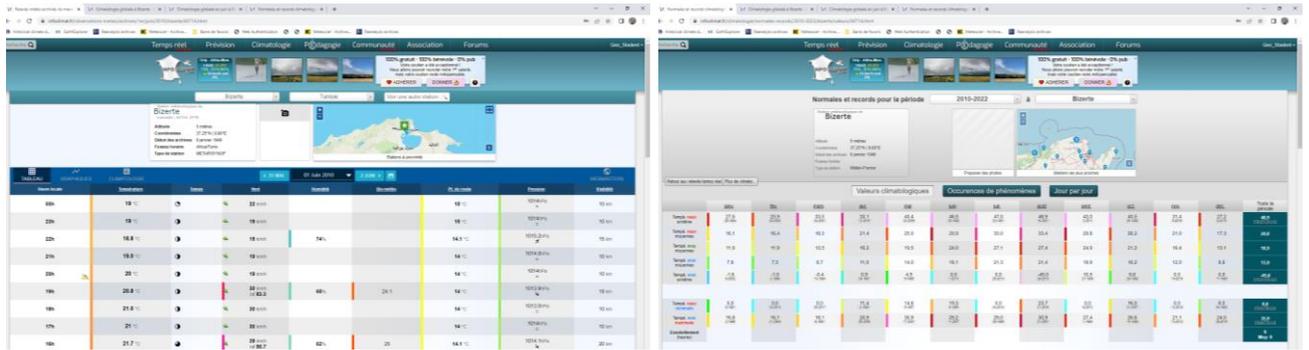
<sup>11</sup> Site dont le vent dominant arrivait de l'usine Elfouledh



**Figure 2. 24. Emplacement des stations météorologiques de Sidi Ahmed et celle installée au centre-ville (DAVIS) (Google Earth)**

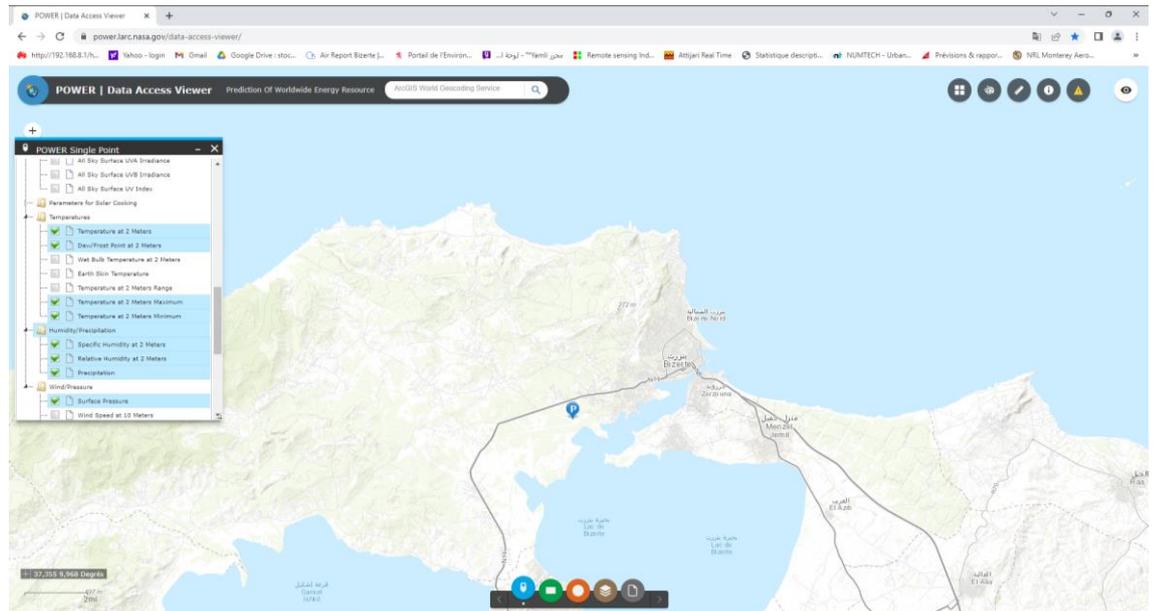


**Figure 2. 25. Exemples des données météorologiques utilisées (INM-METAR) (NOAA, Web)**



**Figure 2. 26. Exemples des données météorologiques utilisées (Infoclimat)**  
(Infoclimat, Web)

- Des valeurs horaires de la direction et la vitesse du vent, de la température de l'air et du point de rosée, la visibilité et la pression atmosphérique de la station sise à l'aérodrome de Sidi Ahmed à Bizerte qui sont des données de la NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Daily Data (Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2.89 meters). Elles couvrent la période 1990-2022 (Fig. 2.27).

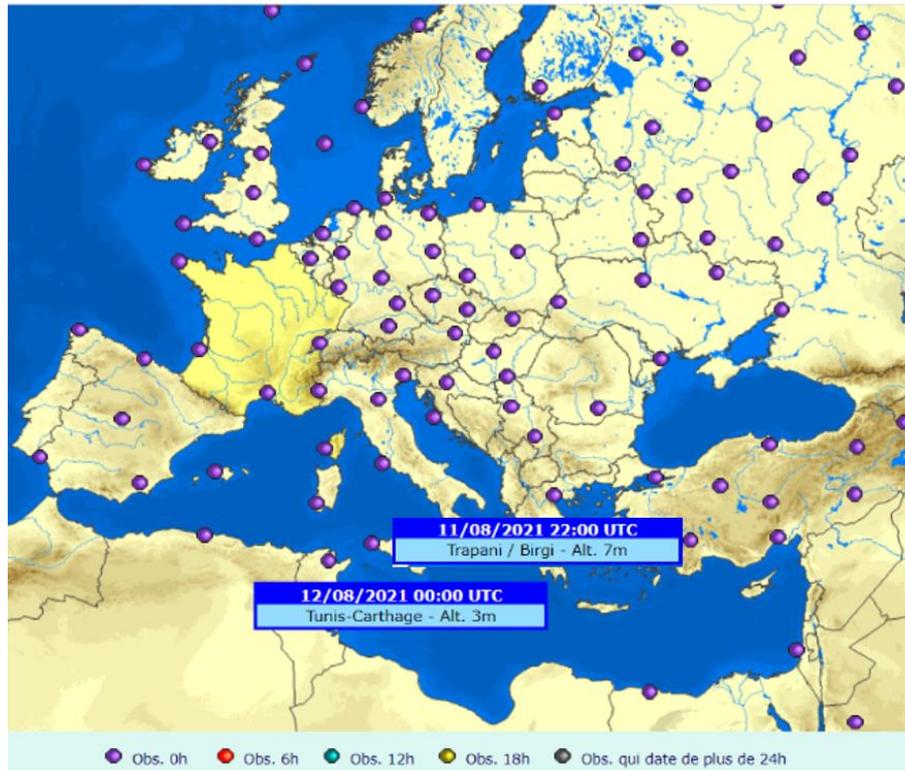


**Figure 2. 27. Exemples des données météorologiques utilisées (NASA-MERRA2)**  
(NASA, Web)

- Emagrammes : Les radiosondes sont lancées à 00h, 06h, 12h et 18h. Pour la Tunisie du nord<sup>12</sup>, les données sont issues de la radiosonde lancée depuis l'aéroport de

<sup>12</sup> Occasionnellement, on peut trouver des données de radiosonde lancée depuis Tozeur (Sud-Ouest de la Tunisie) mais cette station est très éloignée de la zone d'étude.

Tunis-Carthage à minuit (00h). A défaut, on va utiliser les données de la radiosonde lancée depuis Trapani en Italie (Fig. 2.28).



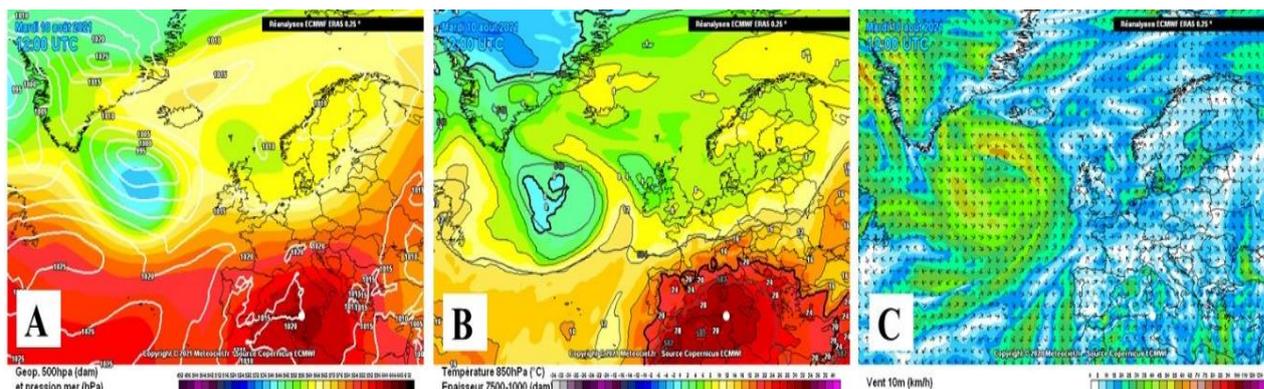
**Figure 2. 28. Exemple de carte des éogrammes des radio-sondes**  
(Site web de Meteociel)

- Les cartes du Geopotential 500 et 850 hPa et de la pression au niveau de la mer (Fig. 2.29) : Ces cartes sont des cartes archivées sur le site de Meteociel et ont été créées à partir des réanalyses de la ECMWF. Elles sont de résolution  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ <sup>13</sup>. A cette résolution on peut également avoir les températures, le vent et les précipitations à la surface avec des zooms sur les pays.

Aussi, nous avons eu recours aux cartes des :

- Réanalyses de NASA/GEOS5 d'une résolution de «  $0.25^\circ$  environ »
- Réanalyses de CEP/ECMWF d'une résolution de  $0,4^\circ$
- Réanalyses CFS (Climate Forecast System) de Wetterzentrale d'une résolution de  $0,5^\circ$
- Réanalyses de NOAA NCEP d'une résolution de  $2,5^\circ$

<sup>13</sup> Sachant que  $1^\circ$  à l'équateur vaut 111,11 Km, la formule à appliquer pour trouver la précision spatiale kilométrique du modèle ECMWF ERA5 au niveau de Bizerte est la suivante :  $(111,11 \times (\text{Cos}(37^\circ)) \times 0,25) = 21,25$  Km. Elle est semblable à la précision du modèle GFS Operational ( $0,250^\circ$ ). La précision du modèle NCEP est de  $2,5^\circ$ , ce qui vaut 212 Km sur Bizerte.



**Figure 2. 29. Exemples de cartes de géopotential 500 hPa (A), de la température au niveau 500 hPa (B) et du vent (C)**

Le point blanc désigne Bizerte  
(Modèle GFS, site web de Meteociel)

### 3.4.8- Données météorologiques de la station DAVIS

Afin de mieux cerner les caractéristiques météorologiques de l'agglomération de Bizerte, une station météorologique automatique DAVIS est installée :

- Au CRDA de Bizerte au centre-ville dans un site qui se caractérise par son aspect administratif et résidentiel très fréquenté (Fig. 2.30 à gauche). Elle couvre la période du 07/08/2020 au 21/09/2020.
- Dans le quartier résidentiel de Zeqaq-Ezzouz au nord de l'agglomération de Bizerte (Fig. 2.30 à droite) et ce du 04/02/2023 au 31/08/2023.



**Figure 2. 30. Stations météorologiques installées (A) au centre-ville de Bizerte sur le toit du CRDA et (B) à Zeqaq-Ezzouz dans la zone résidentielle au nord de Bizerte**  
(A : cliché personnel et B : cliché DAHECH S.)

Les paramètres enregistrés sont la température de l'air, température du point de rosée, humidité relative, direction et vitesse du vent et pression atmosphérique. Cette station enregistre les données à un rythme demi-horaire ce qui permet un suivi des brises thermiques ou du sirocco à une résolution temporelle fine et détaillée (Fig. 2.31).



**Figure 2. 31. Récupération des données météorologiques de la station DAVIS installée au centre-ville**  
(Cliché personnel)

Nous avons aussi eu recours à des campagnes de mesure semi-itinérantes des différents paramètres climatiques : température, humidité relative, vitesse et direction du vent. Les mesures thermo-hygométriques ont été réalisées du 15 au 21 août 2021 et 2022 grâce à un thermomètre à sonde interchangeable de Type TESTO. Le circuit suivi permet de couvrir les zones d'entraînement et d'influence des brises. Cet itinéraire commence des hauteurs d'Ennadhour (forêt) et suit le couloir topographique qui mène jusqu'à la limite nord-ouest de l'agglomération de Bizerte. Puis il traverse le centre-ville en direction de la corniche pour atteindre la pointe nord-est de la côte. Au niveau de Bizerte Sud, quelques points de mesure

sont choisis à Menzel Abderrahman et Zarzouna. Ces mesures sont réalisées sur trois périodes de la journée : le matin, le début de l'après-midi et la fin de l'après-midi.

En parallèle, des mesures météorologiques (température, humidité relative et vent), à une échelle plus fine, ont été réalisées dans le quartier européen en prenant en considération la variabilité de la morphologie urbaine et la direction dominante de la brise de mer.

Ces campagnes semi-itinérantes, au mois d'août 2021 et août 2022, couvrent un réseau de 27 points de mesures pour l'échelle de l'agglomération (81 mesures effectuées par jour) et 14 points au niveau du quartier européen (42 mesures effectuées par jour). Lors des mesures, le moyen de déplacement varie en fonction de l'échelle spatiale. En effet, nous avons parcouru l'agglomération en voiture et le quartier européen du centre-ville à pied.

### **3.4.9- Morphologie urbaine 3D :**

Les milieux urbains ont une morphologie hétérogène qui affecte considérablement la dispersion des polluants atmosphériques (Derbez *et al.*, 2001 ; Maignant, 2007). Pour cette raison, l'acquisition d'un modèle 3D du quartier européen du centre-ville, avec ses différentes composantes, est un atout pour une cartographie plus fine et plus efficiente<sup>14</sup>. Cette option de travail nécessite une masse de données très importante et des manipulations d'outils et de techniques qui ne ressortent pas de notre cadre de travail.

Dans un but de mieux visualiser, analyser et interpréter les données de l'aérodologie et de la pollution atmosphérique à Bizerte, un échantillon de la ville, le quartier européen, a été dessiné en 3D en numérisant :

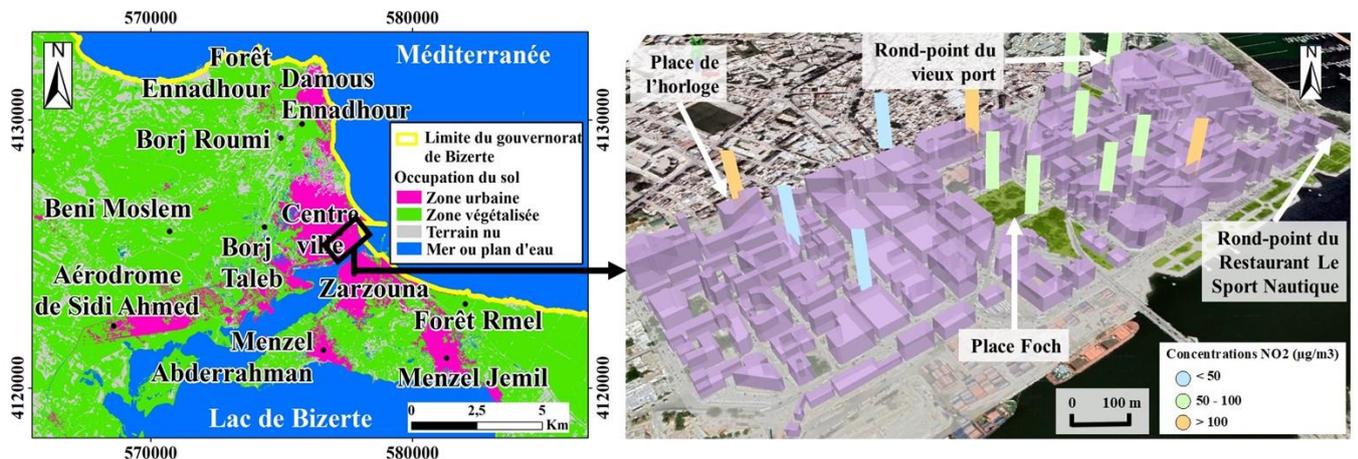
- Le bâti
- Les zones vertes
- La voirie routière

Les hauteurs des bâtiments sont utilisées comme information Z puis extrudés. L'extrusion consiste à étirer verticalement une forme 2D plate afin de créer des bâtiments à trois dimensions (Fig. 2.32).

---

<sup>14</sup> D'autres outils de mesure qui permettent d'affiner plus la résolution des données et de faire des coupes de concentration sur une coupe Altitude/Temps est le balayage de l'espace par périscope. Ceci nécessitera l'installation de : (1) Radar et sodar (2) Station au sol de mesure météorologique et chimique.

Cette maquette 3D du quartier européen a été utilisée comme base pour le calcul du Facteur de vue du ciel (en anglais Sky View factor, SVF).



**Figure 2. 32. Exemple de l'utilisation de la maquette 3D du quartier européen : Répartition spatiale des concentrations NO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte drapées sur sa maquette 3D**

(Mesures en fin de l'après-midi de 17h30 à 18h00 les 20 et 21 août 2021 et travaux personnels de modélisation 3D)

#### 4- Prétraitements des données :

##### 4.1- Contrôle de la qualité des données et détection des anomalies

Comme l'exige les éthiques de la gestion de l'information, la qualité des données des lots recueillis ont fait l'objet de contrôle de qualité afin de détecter les anomalies, erreurs ou oublis. Cette étape est nécessaire surtout qu'on est amené à les combiner avec d'autres types de données issues de sources différentes. Il est à noter aussi qu'il est nécessaire d'avancer, dans la mesure du possible, des explications sur les causes possibles des erreurs détectées et lacunes observées.

Dans le cas de notre sujet, il est à signaler que les traitements exigent des matrices de données complètes et synchronisées afin d'établir des liens entre les concentrations des polluants considérés et les variables météorologiques.

Généralement, il y a deux types d'erreurs à rechercher : les erreurs accidentelles qui sont ponctuelles, et les erreurs systématiques qui concernent une portion de série de mesures. Toutefois, certaines anomalies statistiques ne sont pas des erreurs de mesures mais des erreurs d'échantillonnage causées par des phénomènes exceptionnels ou des ruptures de stationnarité.

La fiabilité des données a été vérifiée en examinant celles qui sont aberrantes, ainsi que les erreurs aléatoires qui portent sur la cohérence entre les paramètres et sur la cohérence temporelle des données et ce en exploitant les facteurs d'aplatissement et les boîtes à moustaches (Boxplot) qui donnent une idée claire sur le degré « d'étirement » des données et sur la densité et la fréquence des valeurs extrêmes. Dans une étape ultérieure, en fouillant dans les données et en les comparant aux normales saisonnières et mensuelles, on est en mesure d'identifier les valeurs qui sont incohérentes. D'autres critères, plus simples, sont aussi considérés. Il s'agit par exemple du fait que la température du point de rosée ne doit pas dépasser la température de l'air. Aussi, la valeur de l'humidité ne doit pas dépasser 100% (atteint rarement les seuils de 70-80% pendant la saison chaude dans la zone d'étude).

#### **4.2- Approche statistique**

Dans le but d'évaluer la qualité statistique des données, des analyses descriptives ont été réalisées. Cette démarche va nous permettre d'avoir une idée sur les valeurs manquantes, les moyennes, les amplitudes, les écart-types, les degrés d'aplatissement, les asymétries, ...

Une fois la qualité des données est vérifiée, le recours à une technique de classification basée sur des principes et concepts scientifique est incontournable. Les résultats diffèrent selon la méthode et son paramétrage, mais elles cherchent toutes à mettre en place des groupes (classes) ayant une variance intra-groupe minimale et une variance inter-groupes maximale.

En se basant sur la bibliographie, les expériences réalisées convergent vers l'utilisation de deux techniques en parallèle. Il s'agit de l'Analyse en Composantes principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Ce choix est devenu courant dans l'établissement des Types de temps avec des variantes dans le choix de la méthode de classification.

D'après la bibliographie, c'est Maheras (1984a, 1984b) qui a produit, avec des données de la station de Tessalonique en Grèce, la première classification objective-automatique des Types de temps.

En 2007, cette méthode a été reprise par Martin et Carrega dans « Les Types de circulation atmosphérique et la pollution par l'ozone dans les Alpes-Maritimes. ».

Dans notre situation, puisqu'on dispose d'un grand jeu de données multivariées contenant plusieurs variables continues (qui s'étale sur 33 ans de 1990 à 2022) à une fréquence journalière et horaire), l'analyse en composantes principales (ACP) a pour objectif essentiel de réduire la dimension des données en quelques variables continues où ne sont conservées que les

informations les plus importantes. Ensuite, on peut effectuer la classification, plus stable théoriquement, sur les résultats de l'ACP.

La méthodologie adoptée dans ce travail est le résultat d'un grand nombre d'essais (en exploitant le Add-In XLSTAT d'Excel) axée essentiellement sur les étapes suivantes :

- La première étape consiste toujours à effectuer une ACP sur la matrice de données : seules les composantes dont la valeur propre est supérieure à 1 et la valeur du Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) est supérieure ou égale à 0,5 sont conservées.
- Puis différents algorithmes ont été testés : « k-means clustering » (non hiérarchique), CAH selon différentes méthodes d'agrégation (lien moyen, méthode de Ward).

Dans notre démarche différents seuils ont été pris en considération. Ils sont comme suit :

- Dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C
- Anomalies thermiques entre :
  - Tn et Tn normale du mois
  - Ty et Ty du mois
  - Tx et Tx normale du mois
- Ecart entre Tx et température maximale moyenne  $\leq - 5^{\circ}\text{C}$  ou  $\geq 5^{\circ}\text{C}$
- Ecart entre Tn et température minimale moyenne  $\leq - 5^{\circ}\text{C}$  ou  $\geq 5^{\circ}\text{C}$

Le choix de ces seuils est basé sur les faits suivants :

- Les orientations des médecins qui évoquent qu'un « *un coup de chaleur est défini par l'augmentation rapide de la température centrale supérieure à 40 degrés, associée à des symptômes neurologiques chez des sujets exposés à une charge thermique élevée* » (Salathé *et al.*, 2012). Selon le même auteur, l'air humide aggrave les choses, « *Dans une atmosphère chaude (> 33° C) et humide (> 70%), ces mécanismes (de thermorégulation) peuvent être dépassés, exposant l'organisme au coup de chaleur* ».
- Être au-dessus du seuil d'écart entre la température maximale et la normale thermique pour la sélection des jours de sirocco et ce en vue de mieux cerner les jours les plus chauds. Aussi, même avec le 99<sup>ème</sup> centile, la température maximale est à 42,1°C, alors que dans le 1% restant figurent des cas très importants pour la caractérisation des ambiances relatives aux classes des types de temps et des jours de sirocco.
- Garder le même écart de température au-dessus (5°C de plus) et en dessous (5°C de moins) des normales par rapport à la température maximale et la température minimale

Après les opérations de contrôle de la qualité des données, une classification automatique, fondée sur les anomalies thermiques enregistrées durant la saison chaude (de juin à septembre), a été élaborée. Ensuite, on a analysé des cartes de pression en surface et en altitude ainsi que celle des flux pour comprendre les configurations barométriques responsables des anomalies thermiques.

Pour les données de la pollution atmosphérique, on a choisi à exploiter les différents seuils considérés par l’OMS, AIRPARIF et l’ANPE, notamment le seuil d’information et de recommandation et le seuil d’alerte pour les différents polluants considérés dans cette étude.

#### **4.3- Croisement des données et modélisation**

Les propriétés de l’environnement des points d’observations sont utilisées comme variables explicatives du phénomène (Martin et Adnès, 2014). Cette méthode se situe à l’interface entre une démarche purement déterministe et une autre purement spatiale, puisque le choix des variables environnementales n’est pas aléatoire mais justifié par le niveau de corrélation statistique entre ces données avec le phénomène à modéliser. La pertinence d’une telle démarche est évaluée notamment en laissant de côté un certain nombre de points d’observations en amont de l’élaboration du modèle ; ceux-ci serviront à valider les résultats.

Le modèle de régression multiple permet de calculer une variable en partant des variables explicatives appelées également prédicteurs ou covariables.

La cartographie des résidus de la modélisation des concentrations d’ozone permet de voir les observations « responsables » de la faiblesse de la valeur de  $R^2$  du modèle

Une étape de validation a été conduite pour tester la robustesse de la solution adoptée. Sur le nombre total des observations (scindées par période la journée : matin, après-midi et soir), 25 % sont choisies avec une bonne répartition par rapport à l’ensemble des données utilisées pour servir à l’étape de la validation. Ce test a été conduit à plusieurs reprises dans le but de s’assurer au mieux de la solidité du modèle.

La régression Ridge a été utilisée pour la première fois par Hoerl et Kennard (1970).

En 2005, dans leur article portant sur « Une évaluation critique des approches de régression basées sur le rétrécissement pour estimer les effets néfastes sur la santé de plusieurs polluants atmosphériques<sup>15</sup> », Roberts et Martin ont comparé les régressions Lasso, Ridge et le modèle

---

<sup>15</sup> L’article est en anglais : « A critical assessment of shrinkage-based regression approaches for estimating the adverse health effects of multiple air pollutants »

log-linéaire de Poisson. Les résultats qu'ils ont obtenus ont montré que « *Les régressions lasso et Ridge ont produit des estimations plus précises des effets néfastes sur la santé des multiples polluants atmosphériques que celles produites à l'aide du modèle log-linéaire de Poisson. Cette augmentation de la précision s'est faite au détriment d'un biais accru. La régression Ridge a produit des estimations plus précises que le lasso, mais le lasso a produit des modèles plus interprétables* ».

## **Conclusion**

Les données recueillies sont de différentes natures et sont issues de différentes sources. Elles ont fait l'objet de tests et de comparaisons, en se référant aux directives de validité des données pour les traitements statistiques et cartographiques, notamment celles de 2008/50/EC. Ces différentes évaluations nous amené à ne prendre en considération que les données qui répondent convenablement aux exigences de ces directives (à cause de l'aspect lacunaire de certaines d'entre-elles, notamment l'ozone troposphérique et le dioxyde de soufre) et ceci en vue de garantir la qualité des traitements et des résultats obtenus.

Suite à cette étape, ces données traitées et validées sont mise en forme et filtrés pour mieux les adapter aux motifs de traitements ultérieurs. Ces motifs seront détaillés dans les chapitres suivants. Il s'agit en particulier de la classification des types de temps, l'identification des jours des brises thermiques et du sirocco et les statistiques en relation, la répartition spatiotemporelle des différents polluants atmosphériques considérés dans cette étude et la modélisation statistique et cartographiques de l'ozone troposphérique.

## **PARTIE 2**

# **TYPES DE TEMPS ESTIVAUX, BRISES THERMIQUES ET SIROCCO A BIZERTE**

## **CHAPITRE 3**

### **TYPES DE TEMPS ESTIVAUX À BIZERTE**

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des traitements statistiques appliqués sur les différentes données qui nous ont permis de faire apparaître les classes des types de temps en terme d'états de l'atmosphère et des types de circulation. L'approche multiscale (dans le temps) adoptée a traité le sujet dans une échelle globale (de toute la saison chaude de 1990-2022), puis à une échelle plus fine (par mois) afin de déceler les spécificités de chacun d'entre eux.

## **1- Classification globale de la saison chaude durant la période 1990-2022 à Bizerte :**

Dans le but de trouver la classification qui donne les meilleurs résultats, on a testé plusieurs configurations de CAH (Type de proximité et Méthode d'agrégation : lien moyen, méthode de Ward). Sur la base des résultats obtenus, la dissimilarité de « Distance euclidienne » selon Méthode d'agrégation « Critère de Ward » semble produire les meilleurs résultats (écarts-type intra classe les plus faibles et inter-classes le plus fort sauf pour le cas du mois de juillet où on a une légère différence au profit de la méthode « Lien moyen »). Cette configuration est mentionnée par Martin et Carrega en 2007 comme étant donnant les meilleurs résultats. Elle sera donc adoptée pour élaborer la classification des types de temps pendant les saisons chaudes 1990-2022 à Bizerte.

### **1.1- Classification globale des états de l'atmosphère de la saison chaude durant la période 1990-2022 à Bizerte**

La classification des états de l'atmosphère durant la saison chaude (juin, juillet, août et septembre) de la période considérée (1990-2022) est fondé sur les formules suivantes : Température maximale ( $T_x$ ) – normale de la saison, Température minimale ( $T_n$ ) – normale de la saison) et l'amplitude thermique. Après plusieurs essais de classification où la troncature est laissée « automatique », certaines classes générées ne comptent que quelques observations (< 10). Pour cette raison, le choix du nombre des classes est arrêté à trois. Le résultat est comme suit :

- (1) Une première classe représentant 26,9% du nombre total des observations, où les moyennes des écarts aux normales de la saison sont  $0,39^\circ\text{C}$  pour  $T_n$  et  $4,7^\circ\text{C}$  pour  $T_x$ . On compte dans cette classe 137 cas où  $T_x$  a dépassé les  $40^\circ\text{C}$  et 3 cas où elle a dépassé les  $45^\circ\text{C}$ . La moyenne de l'amplitude thermique est de  $16,2^\circ\text{C}$ . Les vents sont généralement d'une orientation sud-ouest et d'une vitesse, à 2m d'altitude, entre 5,5 et 6,9 m/s.
- (2) Une deuxième classe d'un effectif égal à 1510 observations représentant 37,6% du nombre total des observations. Les moyennes des écarts aux normales de la saison sont moins

importantes que pour la classe 1. Elles sont de 1,9°C pour Tn et -0,5°C pour Tx. Le vent moyen est de 4,4 m/s.

(3) Dans la troisième classe qui représente 35,5% du nombre total des observations, les moyennes des écarts aux normales thermiques de la saison sont négatives indiquant des anomalies en dessous des normales. Son amplitude thermique est plus proche de la deuxième classe : elle est de 10,9°C. Dans cette classe, on ne trouve pas des écarts aux normales thermiques de la saison qui sont  $\geq 5^\circ\text{C}$ . Cependant, elle compte 81,7% des écarts entre Tn et la normale de la saison et 97% des écarts entre Tx et la normale de la saison qui sont  $\leq -5^\circ\text{C}$ . Le vent moyen est de 3,8 m/s.

## **1.2- Circulations atmosphériques associées aux différents états de l'atmosphère à Bizerte à travers des exemples :**

La saison chaude (de juin à septembre) est généralement caractérisée par un temps calme et ensoleillé suite à la remontée et l'extension vers le nord des hautes pressions atlantiques subtropicales. Un beau temps durable domine durant cette saison avec des intermittences de perturbations liées aux fortes chaleurs donnant lieu parfois à des pluies convectives. Au niveau du champ de pression, la situation est caractérisée par la présence permanente de l'anticyclone subtropical en altitude. Cependant, en surface, différentes configurations barométriques conditionnent le type de temps en place : il s'agit des situations de dorsale barométrique ou encore de talweg barométrique, mais aussi et notamment des situations de marais barométrique plus fréquentes.

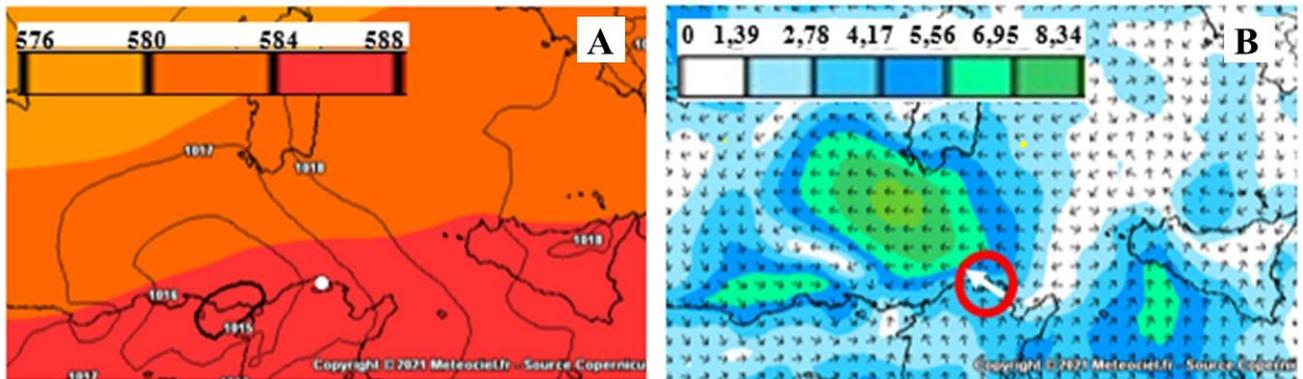
À Bizerte, en considérant la saison chaude dans son intégralité, trois principaux types de temps ont été mis en évidence pendant la saison chaude de la période 1990-2022 (SELLAMI *et al.*, 2022 et 2023) :

(1) Un premier type de temps très chaud avec des anomalies thermiques importantes soit au niveau des Tn et Tx, une humidité relative faible au milieu de la journée. Ce type de temps est associé dans 24% de son effectif à des advections de sirocco<sup>16</sup> (7 à 8 jours de sirocco/an). On trouve aussi une moyenne de 32,5 jours de brise/an (le rapport global est de 120 jours/an). Ce type de temps est associé aussi à une dorsale barométrique en altitude dont l'axe est orienté sud-nord, et parfois sud- nord nord-est.

---

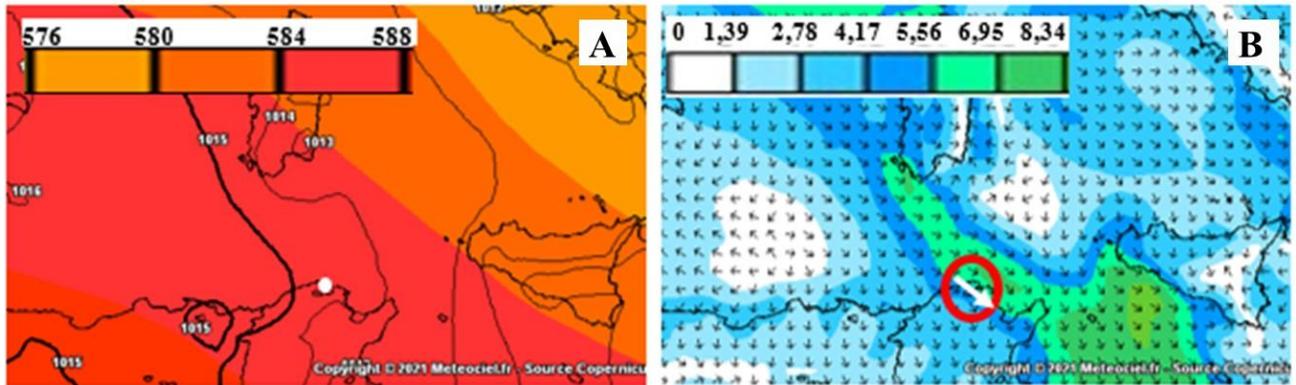
<sup>16</sup> Une journée est considérée avec sirocco dans le cas où un vent venant du Sahara (du sud sud-est au ouest sud-ouest) avec une vitesse quotidienne moyenne ne dépassant pas 6 m/s, achemine une masse d'air chaude et sèche : un écart positif d'au moins 4°C par rapport à la moyenne mensuelle au niveau des températures maximales et une humidité relative minimale inférieure à 30% doivent être enregistrés (Dahech, 2007)

A la surface, on a soit une dorsale barométrique d'une orientation globale sud-nord ou sud sud-est, soit un marais barométrique. Les vents sont généralement d'une orientation sud-ouest et d'une vitesse, à 2m d'altitude, entre 5,5 et 6,9 m/s. Cette combinaison des situations en altitude et en surface est responsable des excès de chaleur et des anomalies thermiques, surtout pour Tx comme le cas le 21/09/2010 (Fig. 3.1).



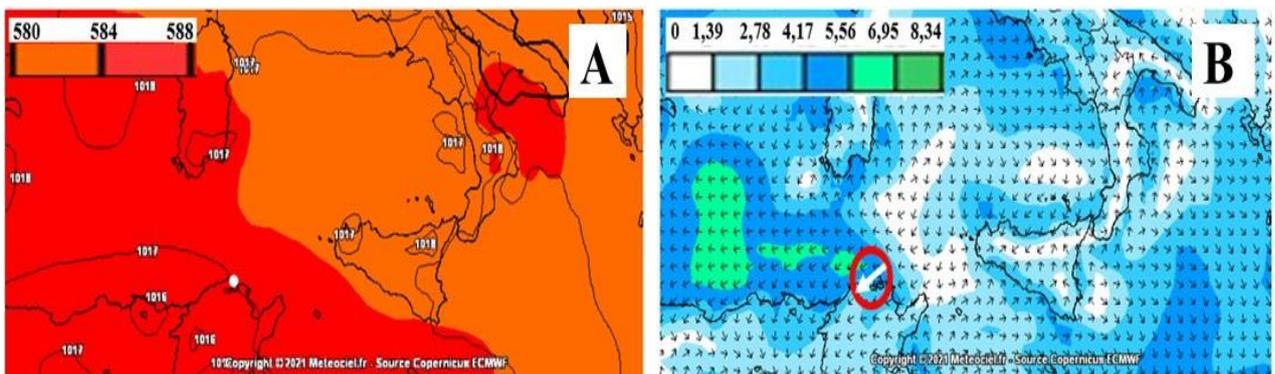
**Figure 3. 1. Carte du géopotentiel 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 21/09/2010 à 13 h (heure locale).** Vitesses converties de km/h en m/s (le pas original est de 5 km/h). Le point blanc désigne Bizerte et la flèche en blanc désigne la direction du vent sur Bizerte (ERA5, Copernicus ECMWF (meteociel.fr))

- (2) Un deuxième type de temps qui fait 37,6% des observations totales. C'est un type de temps moins chaud avec des anomalies thermiques par rapport à la saison qui sont moins prononcées que le premier (légèrement au-dessus de la normale saisonnière pour la température moyenne et légèrement en dessous de la normale saisonnière pour Tx). La fréquence de la brise thermique dans cette classe est plus apparente. Elle est de 45,1 jours/an. Cette brise peut être entrecoupée par un vent synoptique quand la brise est censée être active. Dans l'exemple ci-après du 27/07/2008 (Fig. 3.2), malgré une dorsale barométrique en altitude (500 hPa) d'une orientation globale sud-nord, le vent intercepté à la station de Sidi Ahmed à Bizerte est d'une orientation ouest à nord-ouest généré par une dorsale barométrique en surface d'une orientation ouest nord-ouest (Le vent est d'une vitesse entre 7-8 m/s).



**Figure 3. 2. Carte du géopotentiel 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 27/07/2008 à 13 h (heure locale).** Vitesses converties de km/h en m/s (le pas original est de 5 km/h). Le point blanc désigne Bizerte et la flèche en blanc désigne la direction du vent sur Bizerte (ERA5, Copernicus ECMWF (meteociel.fr))

- (3) Un troisième type de temps plus frais, caractérisé par des anomalies thermiques négatives (en dessous des normales saisonnières dont les écarts vont de  $-2,2^{\circ}\text{C}$  pour  $T_n$  à  $-3^{\circ}\text{C}$  pour  $T_x$ ). Ce type de temps comporte une grande occurrence de jours de brise qui avoisine les 97% de son effectif. La circulation atmosphérique de ce type de temps est caractérisée en altitude (géopotentiel 500 hpa) par une dorsale d'orientation globale ouest-est et au niveau de la mer par un marais barométrique. Cependant, les vents peuvent avoir des orientations du quadrant nord (notamment nord-est) sous l'effet de cellules dépressionnaires au nord de la Tunisie qui aspirent l'air venant du quadrant sud (Fig. 3.3).



**Figure 3. 3. Carte du géopotentiel 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 23/07/2022 à 13 h (heure locale).** Vitesses converties de km/h en m/s (le pas original est de 5 km/h). Le point blanc désigne Bizerte et la flèche en blanc désigne la direction du vent sur Bizerte (ERA5, Copernicus ECMWF (meteociel.fr))

Pour les trois classes des états de l'atmosphère, la pression atmosphérique au niveau de la mer est légèrement variée : elle passe de 1014 hPa pour la première classe à 1016 hPa pour la troisième. La visibilité horizontale moyenne globale est bonne (au-delà de 7 km), mais elle peut descendre à un peu plus que 3 km.

Une étude plus approfondie permettra de déceler les spécificités de chaque mois et de scinder la saison chaude (en ajoutant le mois de septembre). Les premiers résultats indiquent une classification qui débute avec le mois de juin (plus frais au début et plus chaud à sa fin). Les mois de juillet et août comportent des classes chaudes et sèches. Le mois de septembre a un schéma inverse de celui de juin. Il commence par une classe chaude et finit par une classe plus fraîche et humide. C'est le mois d'août qui s'identifie par le nombre le plus important des jours de sirocco et la fréquence la plus importante des brises de mer, mais c'est pendant le mois de juin qu'on a enregistré la séquence de jours successifs de sirocco la plus étendue (05 jours de suite). Le mois d'août a connu l'écart de Tx à la normale le plus important (15,6°C) enregistré le 10/08/2021 où Tx a atteint 48,8°C.

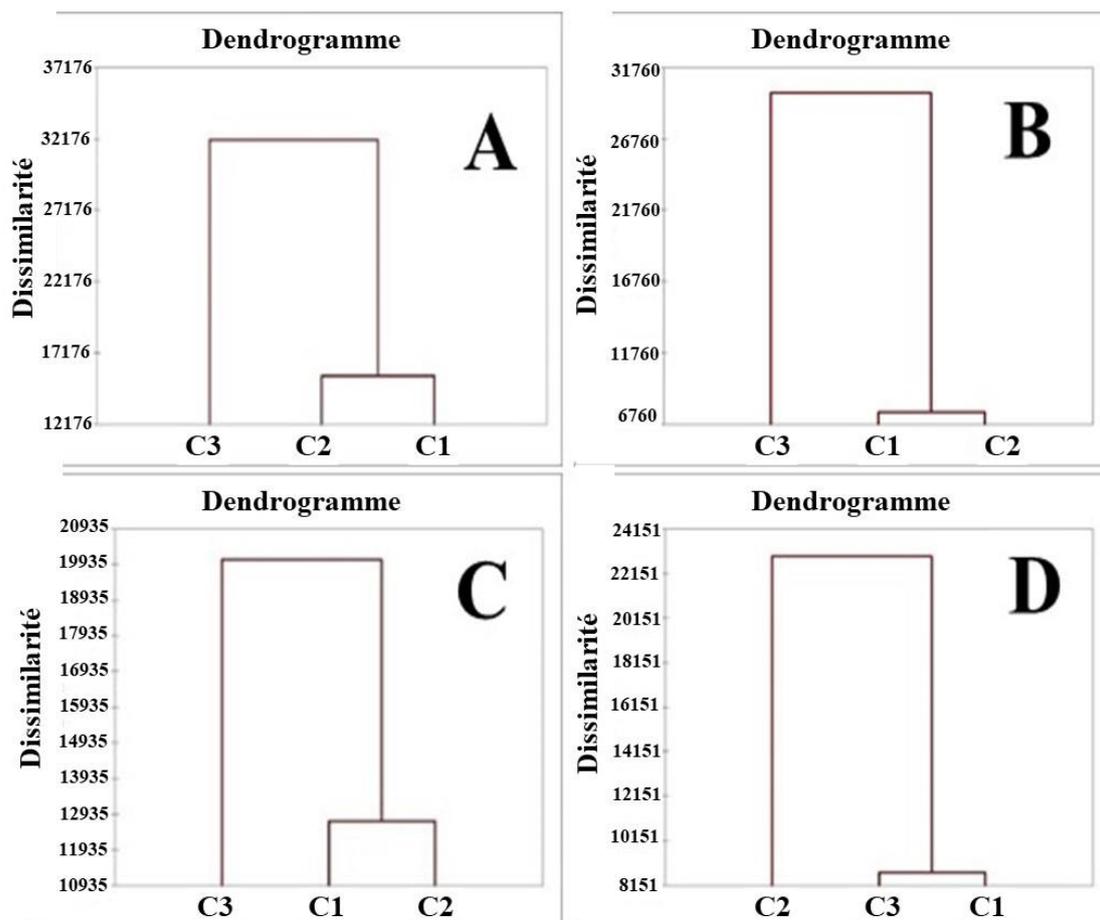
## 2.- Classification par mois de la saison chaude durant la période 1990-2022 à Bizerte

Une étude plus approfondie a permis de déceler les spécificités de chaque mois et de scinder la saison estivale en ses trois mois en ajoutant le mois de septembre (Tab. 3.1. - Tab. 3.6. et Fig. 3.4).

**Tableau 3. 1. Décomposition de la variance pour la classification optimale : saison chaude (1990-2022) :** (Dissimilarité de « Distance euclidienne », Méthodes d'agrégation « Critère de Ward-MW » et « Lien moyen – LM »)

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

	Juin		Juillet		Août		Septembre	
	MW	LM	MW	LM	MW	LM	MW	LM
Intra-classe (%)	19,24	32,91	18,39	37,13	20,03	47,1	19,7	35,88
Inter-classes (%)	80,76	67,09	81,61	62,87	79,97	52,9	80,3	64,12
Total	100	100	100	100	100	100	100	100



**Figure 3. 4. Dendrogrammes respectifs de la CAH des données des mois de juin (A), juillet (B), août (C) et septembre (D) de la période 1990-2022** selon la méthode de dissimilarité « Distance euclidienne » et Méthode d'agrégation « Méthode de Ward » : l'axe vertical représente le niveau des nœuds

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

**Tableau 3. 2. Nombre des observations par classe et par mois durant la saison chaude de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classe	Juin		Juillet		Août		Septembre	
	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%	Nbre	%
1	350	35,35	89	8,71	264	25,86	79	8,04
2	490	49,49	380	37,18	388	38	398	40,49
3	150	15,15	553	54,11	369	36,14	506	51,48
<b>Nombre des obs. par classe et par mois estival</b>	<b>990</b>		<b>1022</b>		<b>1021</b>		<b>983</b>	
<b>Nombre de valeurs manquantes ou supprimées</b>	<b>0</b>		<b>1</b>		<b>2</b>		<b>7</b>	

**Tableau 3. 3. Min., Moy. et Max des paramètres météorologiques par classe pour le mois de juin durant la saison chaude de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classes	Nbre Obs.	Jours TMAX >=30°C	Jours TMAX >=35°C	Jours TMAX >=40°C	Jours TMAX >=45°C	Sirocco	Brise	MIN_C (°C)			DEWP (°C)			TEMP_C (°C)			MAX_C (°C)			WDSP (m/s)			SLP (hPa)			VISIB (km)			Amplitude_Thermique (°C)			Ecart MIN_C-TEMPMINMOY (°C)			Ecart TEMP_C-TEMPMOYMOY (°C)			Ecart MAX_C-TEMPMAXMOY (°C)		
								Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max
								1	350	0	0	0	0	0	171	12,7	17,6	22,6	9,2	15,9	21,8	15,7	21,7	24,8	20,0	25,8	29,2	2,3	10,6	18,9	1008,0	1016,2	1024,1	3,3	7,8	15,4	3,0	8,2	13,4	-4,9
2	490	269	5	0	0	12	429	9,5	16,9	24,6	6,8	16,6	23,9	17,4	24,0	28,3	22,2	30,2	36,7	3,2	7,9	17,0	1005,9	1016,2	1024,0	3,6	7,7	14,6	5,9	13,3	21,3	-8,1	-0,7	7,0	-6,4	0,1	4,5	-7,4	0,5	7,1
3	150	150	114	19	0	57	134	13,5	20,0	26,0	9,1	17,2	23,8	24,9	28,4	34,2	32,0	36,9	43,9	1,0	8,0	13,4	1002,5	1014,1	1019,6	4,5	7,3	13,0	10,2	16,9	27,4	-4,1	2,4	8,4	1,0	4,6	10,3	2,3	7,2	14,2
Total général	990	419	119	19	0	69	734	9,5	17,6	26,0	6,8	16,4	23,9	15,7	23,9	34,2	20,0	29,7	43,9	1,0	8,9	18,9	1002,5	1015,9	1024,1	3,3	7,7	15,4	3,0	12,1	27,4	-8,1	0,0	8,4	-8,2	0,0	10,3	-9,7	0,0	14,2

**Tableau 3. 4. Min., Moy. et Max des paramètres météorologiques par classe pour le mois de juillet durant la saison chaude de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classes	Nbre Obs.	Jours TMAX >=30°C	Jours TMAX >=35°C	Jours TMAX >=40°C	Jours TMAX >=45°C	Sirocco	Brise	MIN_C (°C)			DEWP (°C)			TEMP_C (°C)			MAX_C (°C)			WDSP (m/s)			SLP (hPa)			VISIB (km)			Amplitude_Thermique (°C)			Ecart MIN_C-TEMPMINMOY (°C)			Ecart TEMP_C-TEMPMOYMOY (°C)			Ecart MAX_C-TEMPMAXMOY (°C)		
								Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max
								1	89	89	89	44	1	49	84	19,7	22,7	26,4	6,6	17,8	22,8	28,9	31,2	35,9	37,0	40,1	45,6	3,7	7,6	13,4	1009,2	1013,5	1018,0	3,8	7,2	14,1	12,7	17,4	24,7	-0,6
2	380	379	159	5	0	20	347	12,2	20,0	29,0	6,1	18,8	26,3	21,9	27,6	33,3	29,8	34,7	41,2	2,5	7,8	16,7	1006,7	1014,9	1021,4	4,0	7,7	14,5	5,5	14,7	22,9	-8,1	-0,4	8,6	-4,8	1,0	6,6	-2,8	2,1	8,7
3	553	287	0	0	0	365	12,2	20,3	24,2	10,7	18,5	25,7	20,7	25,2	28,6	25,0	29,9	33,4	2,7	9,9	20,7	1007,9	1016,1	1022,7	3,5	7,9	14,8	4,3	9,6	15,3	-8,1	-0,1	3,9	-6,0	-1,4	1,9	-7,5	-2,7	0,9	
Total général	1022	755	248	49	1	69	796	12,2	20,4	29,0	6,1	18,6	26,3	20,7	26,6	35,9	25,0	32,5	45,6	2,5	8,9	20,7	1006,7	1015,4	1022,7	3,5	7,8	14,8	4,3	12,2	24,7	-8,1	0,0	8,6	-6,0	0,0	9,3	-7,5	0,0	13,1

**Tableau 3. 5. Min., Moy. et Max des paramètres météorologiques par classe pour le mois d'août durant la saison chaude de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classes	Nbre Obs.	Jours TMAX >=30°C	Jours TMAX >=35°C	Jours TMAX >=40°C	Jours TMAX >=45°C	Sirocco	Brise	MIN_C (°C)			DEWP (°C)			TEMP_C (°C)			MAX_C (°C)			WDSP (m/s)			SLP (hPa)			VISIB (km)			Amplitude_Thermique (°C)			Ecart MIN_C-TEMPMINMOY (°C)			Ecart TEMP_C-TEMPMOYMOY (°C)			Ecart MAX_C-TEMPMAXMOY (°C)		
								Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max
								1	264	133	0	0	0	148	17,00	22,08	25,50	5,67	19,70	26,50	21,50	25,80	28,67	24,00	29,75	32,50	0,00	10,11	21,30	1008,80	1015,75	1021,70	3,40	7,69	14,30	1,78	7,67	11,00	-4,15	0,93
2	388	346	79	0	0	5	364	9,72	18,78	22,22	10,00	19,05	25,56	21,50	26,23	32,33	27,89	32,80	39,11	0,00	6,58	15,00	1007,00	1015,79	1022,50	3,80	7,64	15,70	8,72	14,01	24,56	-11,43	-2,37	1,07	-5,77	-1,04	5,06	-5,35	-0,44	5,87
3	369	369	213	59	2	67	320	19,22	22,97	30,00	4,22	20,33	27,06	25,89	29,42	36,94	30,78	36,21	48,89	0,00	7,71	15,60	1003,70	1014,06	1020,80	3,70	6,83	11,60	5,00	13,24	22,28	-1,93	1,82	8,85	-1,38	2,15	9,67	-2,46	2,97	15,65
Total général	1021	848	292	59	2	72	832	9,72	21,15	30,00	4,22	19,68	27,06	21,50	27,27	36,94	24,00	33,24	48,89	0,00	7,90	21,30	1003,70	1015,15	1022,50	3,40	7,36	15,70	1,78	12,09	24,56	-11,43	0,00	8,85	-5,77	0,00	9,67	-9,24	0,00	15,65

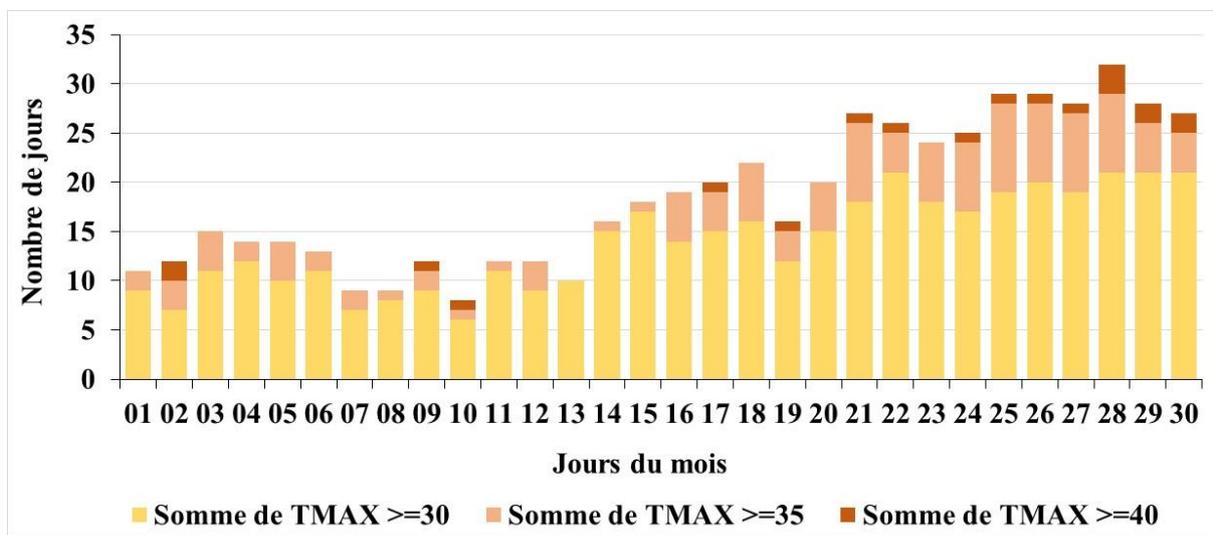
**Tableau 3. 6. Min., Moy. et Max des paramètres météorologiques par classe pour le mois de septembre durant la saison chaude de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classes	Nbre Obs.	Jours TMAX >=30°C	Jours TMAX >=35°C	Jours TMAX >=40°C	Jours TMAX >=45°C	Sirocco	Brise	MIN_C (°C)			DEWP (°C)			TEMP_C (°C)			MAX_C (°C)			WDSP (m/s)			SLP (hPa)			VISIB (km)			Amplitude_Thermique (°C)			Ecart MIN_C-TEMPMINMOY (°C)			Ecart TEMP_C-TEMPMOYMOY (°C)			Ecart MAX_C-TEMPMAXMOY (°C)		
								Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max	Min	Moy.	Max
								1	79	79	75	10	0	37	66	14,89	21,68	32,00	12,89	19,91	26,72	23,72	28,12	34,56	32,89	35,55	43,00	2,90	7,43	15,00	1005,40	1014,37	1021,50	3,80	6,68	11,10	5,00	13,88	21,50	-4,51
2	398	345	15	0	0	14	335	11,39	19,33	26,00	13,11	18,99	25,50	19,11	24,52	28,94	27,50	29,84	32,78	0,00	7,45	17,90	1005,40	1016,27	1024,20	3,60	7,08	14,80	4,61	10,51	19,33	-8,01	-0,07	6,60	-5,41	0,00	4,42	-2,38	-0,04	2,90
3	506	9	0	0	0	0	276	11,39	17,97	22,50	10,56	16,78	22,06	17,22	22,03	24,89	21,28	26,04	27,39	0,00	8,65	19,40	1006,60	1016,60	1025,70	4,30	7,65	15,70	3,00	8,07	15,28	-8,01	-1,43	3,10	-7,30	-2,49	0,37	-8,60	-3,84	-2,49
Total général	983	433	90	10	0	51	677	11,39	19,40	32,00	10,56	18,58	26,72	17,22	24,52	34,56	21,28	29,88	43,00	0,00	7,76	19,40	1005,40	1016,02	1025,70	3,60	7,16	15,70	3,00	10,48	21,50	-8,01	0,00	12,60	-7,30	0,00	10,04	-8,60	0,00	13,12

## 2.1- Statistiques de dépassement des seuils pour le mois de juin

Marquant le début de la saison chaude, le mois de juin se caractérise par des températures qui dépasse peu le seuil de 35°C. Sur les 33 années considérées dans cette étude, on compte, comme le montre la figure 3.5, 419 jours où la température a dépassé les 30°C. Ce nombre se divise par trois et demi, si on considère le seuil de 35°C (119 jours). Au-delà des 35°C, il n’y a qu’une vingtaine de jours (19 cas) où la température a dépassé les 40°C. C’est la deuxième quinzaine du mois qui enregistre le plus grand nombre de dépassement de ces seuils (Fig. 3.5). A partir du quatorzième jour du mois, on dépasse plus fréquemment les seuils 30°C, 35°C et 40°C.



**Figure 3. 5. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C et 40°C pour le mois de juin par jour (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

En considérant les jours successifs de dépassement de Tx du seuil de 40°C, on compte en juin quatre cas (1998, 2003, 2006 et 2022) dont celui de 2022 est le plus important (Tab. 3.7).

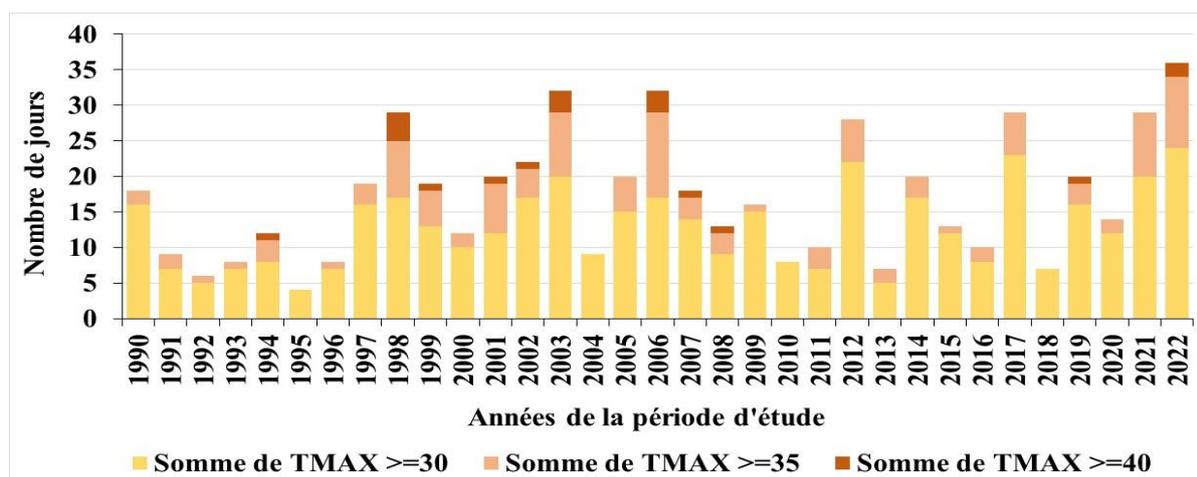
**Tableau 3. 7. Séquence de jours successifs où Tx >= 40°C pendant le mois de juin**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année	Séquence de jours successifs de dépassement Tx >= 40°C			Nombre de jours
	1998	28-30 du mois		
	41,11°C	41,5°C	43,5°C	

Année	Séquence de jours successifs de dépassement $T_x \geq 40^\circ\text{C}$			Nombre de jours
	28-30 du mois			
2003	41,11°C	43°C	43,39°C	3
	21-22 du mois			
2006	40°C			2
	42,89°C			
2022	26-27 du mois			2
	43,89°C	42,89°C		

D'une année à l'autre, presque le 1/3 (12 cas sur 33) enregistre un cumul de cas de dépassement au-delà de 20 jours dont 10 sont considérées par le dépassement du seuil de 40°C. L'année 2022 est une année exceptionnellement chaude pour le mois de juin (Fig. 3.6).

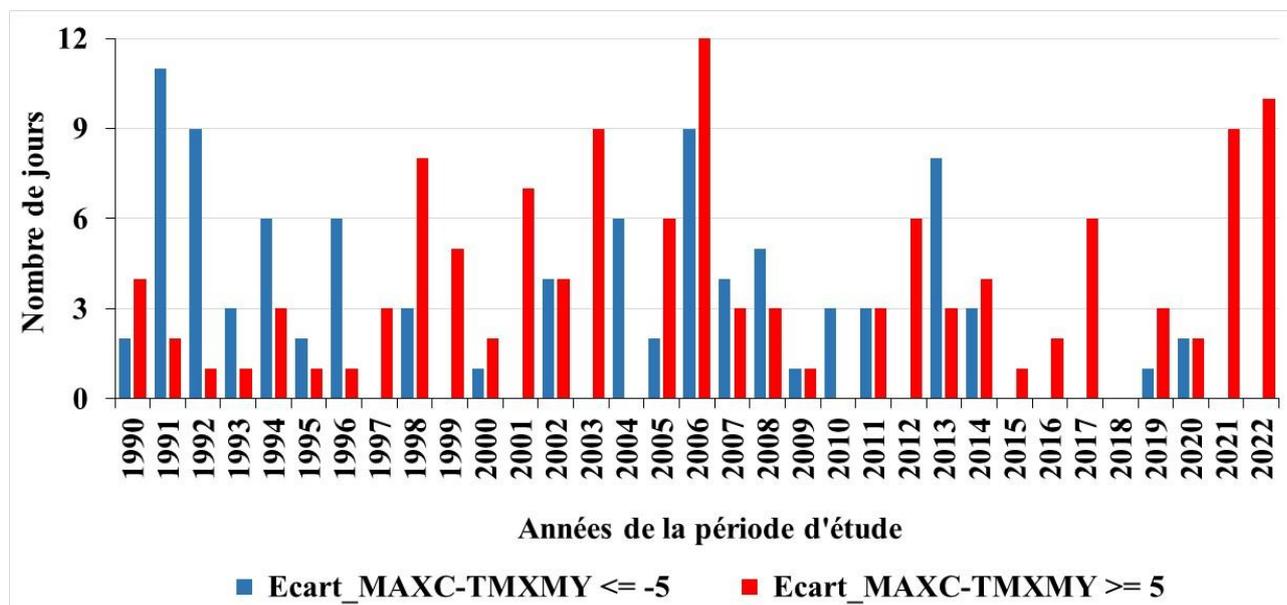


**Figure 3. 6. Nombre de jours de dépassement de  $T_x$  des seuils de 30°C, 35°C et 40°C pour le mois de juin par année (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

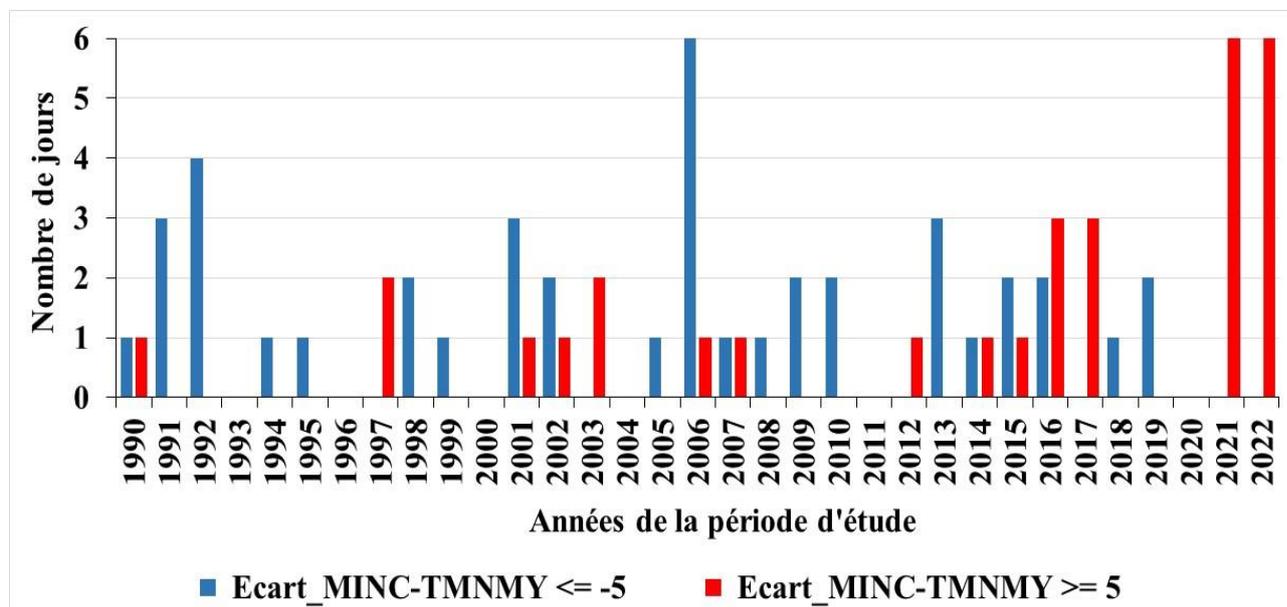
Si on considère l'écart des températures maximale et minimale avec la normale du mois, d'autres constatations peuvent être tirées. En effet, l'écart de 5°C de part et d'autre de la normale du mois de  $T_x$  fait apparaître des années en dessous de la normale du mois de juin (5°C, ou plus, de moins) qui sont au nombre de 7. Celles qui sont au-dessus de la normale du mois de juin sont plus fréquentes entre 1998 et 2006. Les années de 2014 à 2022 s'individualisent par un nombre plus important de jours où on enregistre un écart entre  $T_x$  et la température maximale moyenne  $\geq 5$ . 2003, 2006, 2021 et 2022 en sont les mieux représentatives de cette situation.

Pour 2021 et 2022, même les températures minimales du mois de juin enregistrent un écart avec la température minimale moyenne qui dépasse les 5°C de plus (Fig. 3.7 et Fig. 3.8).



**Figure 3. 7. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tx et température maximale moyenne avec + ou - 5°C du mois de juin (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)



**Figure 3. 8. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tn et température minimale moyenne avec + ou - 5°C du mois de juin (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Pour la répartition des classes des états de l'atmosphère en fonction du nombre des dépassements du seuil de 5°C (ou plus) d'écart avec les normales de Tn et Tx, les informations tirées à partir des tableaux 3.3 et 3.8 indiquent une météo plus fraîche (classe 1) qui occupe plus la première moitié du mois de juin.

**Tableau 3. 8. Ecart à la normale (+ ou - 5°C) du mois de juin pour Tx et Tn et par classe**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classes	Ecart_MAXC- TMXMY <= -5	Ecart_MAXC- TMXMY >= 5	Ecart_MINC- TMNMY <= -5	Ecart_MINC- TMNMY >= 5
Classe 1	89	0	0	1
Classe 2	5	6	42	12
Classe 3	0	119	0	17
<b>Total général</b>	<b>94</b>	<b>125</b>	<b>42</b>	<b>30</b>

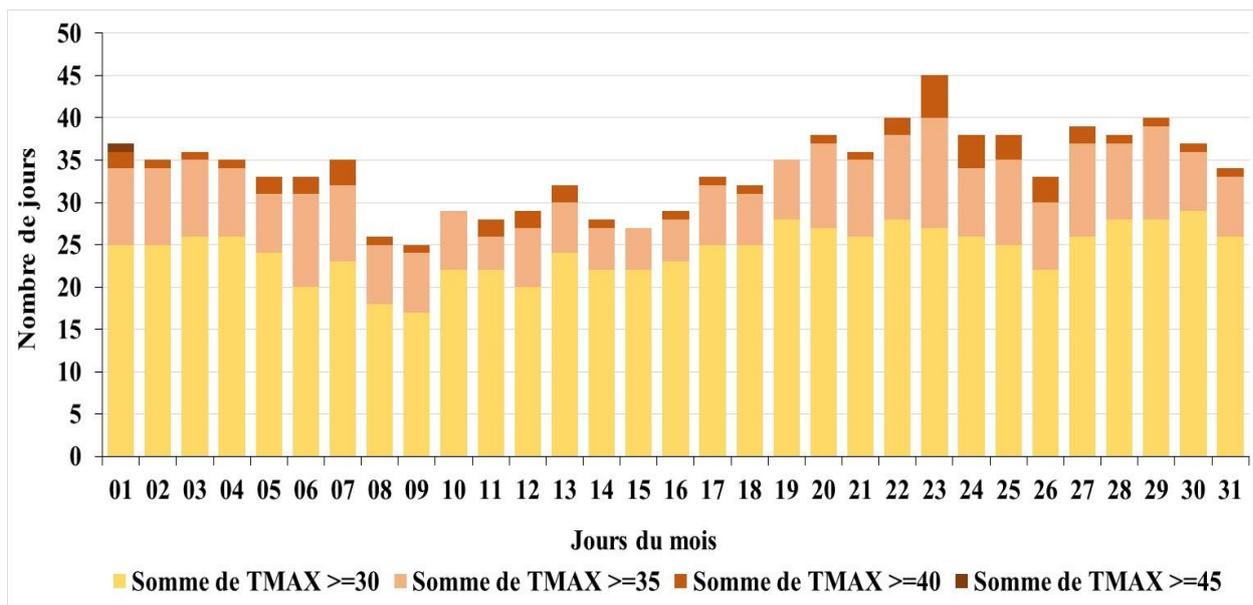
La classe 2 avec une météo légèrement moins humide et plus chaude est répartie de façon assez homogène sur les jours du mois et sur la période considérée (avec une tendance d'occuper la deuxième moitié du mois).

La classe 3 qui s'affiche avec une moyenne d'écart de la température maximale à la normale du mois de l'ordre de 7,2°C et une humidité moins importantes compte moins d'occurrences que les classes 1 et 2, mais qui sont plus nombreuses dans la deuxième moitié du mois de juin et la deuxième quinzaine d'années de la période considérée (1990-2022). Par opposition aux classes 1 et 2, cette classe, n'enregistre pas de jours où l'écart entre Tx et la normale (température maximale moyenne) du mois de juin est négatif.

Ceci s'explique par la tendance vers la hausse des températures qui se dessine du début vers la fin du mois et que les conditions atmosphériques sont propices à l'installation d'un type de temps tel que représenté par la classe 3.

## 2.2- Statistiques de dépassement des seuils pour le mois de juillet

Pour le mois de juillet, il y a moins de différence entre le début et la fin du mois en ce qui concerne le dépassement des seuils. En effet, on enregistre presque pendant 75% de la période des 33 années plus que 20 jours de dépassement (par mois) du seuil de 30°C. A peu près pendant 24% des jours de ce mois, on a plus de 10 jours de dépassement de 35°C et sont répartis entre le début et la fin du mois (Fig. 3.9). Le nombre de jours ayant dépassé le seuil de 40°C est moins important. Il représente 4,6% des jours de la période considérée par l'étude.



**Figure 3. 9. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C pour le mois de juillet par jour (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

En considérant les jours successifs de dépassement de Tx du seuil de 40°C, on compte en juillet sept cas (1993, 1996, 2000, 2005, 2007, 2009 et 2021) dont celui de 2021 est le plus important (Tab. 3.9).

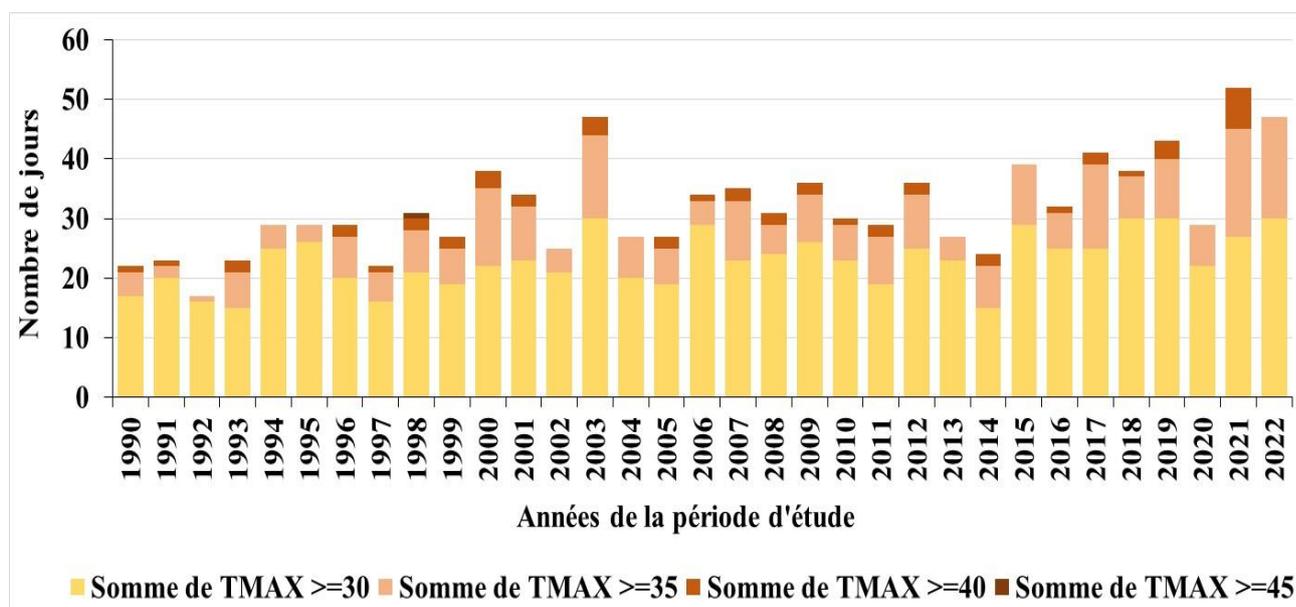
**Tableau 3. 9. Séquence de jours successifs où Tx >= 40°C pendant le mois de juillet**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année	Séquence de jours successifs de dépassement Tx >= 40°C		Nombre de jours
1993	04-05 du mois		2
	41°C	43,88°C	
1996	25-26 du mois		2
	40,38°C	43,88°C	
2000	02-03 du mois		2
	42,11°C	42°C	
2005	17-18 du mois		2
	41,22°C	40,72°C	
2007	23-24 du mois		2
	44,22°C	44°C	

Année	Séquence de jours successifs de dépassement $T_x \geq 40^\circ\text{C}$		Nombre de jours
2009	23-24 du mois		2
	40,28°C	41,72°C	
2021	24-26 du mois		3
	40°C	43°C	

Année par année, huit cas s'individualisent par des dépassements du seuil de  $35^\circ\text{C}$  avec plus de 10 jours. Ils sont plus nombreux entre 2015 et 2022. Il s'agit, en détail, des années 2000, 2003, 2007, 2015, 2017, 2019, 2021 et 2022. De ces huit cas, six ont enregistré des dépassements du seuil de  $40^\circ\text{C}$  avec pour 2021, sept jours de dépassement de ce seuil dont trois sont successifs : les 24, 25 et 26 du mois. Deux autres jours de dépassement successifs des  $40^\circ\text{C}$  sont enregistrés les 28 et 29 du mois. Un seul cas de dépassement du seuil de  $45^\circ\text{C}$  est enregistré pendant le mois de juillet 1998 (Fig. 3.10).



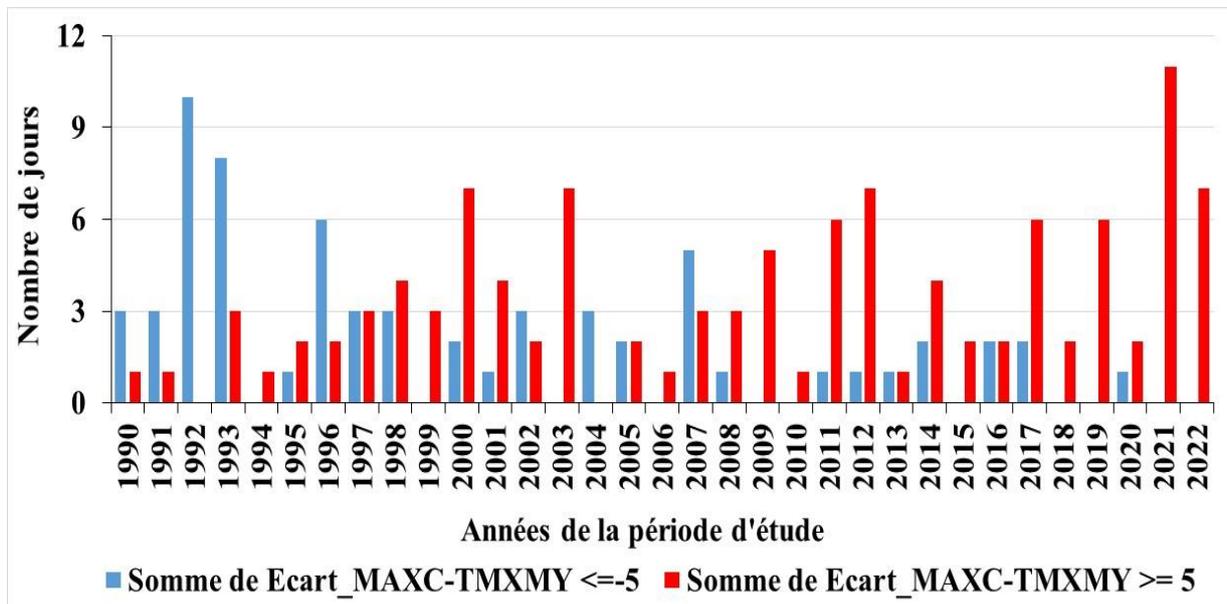
**Figure 3. 10. Nombre de jours de dépassement de  $T_x$  des seuils de  $30^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  et  $45^\circ\text{C}$  pour le mois de juillet par année (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

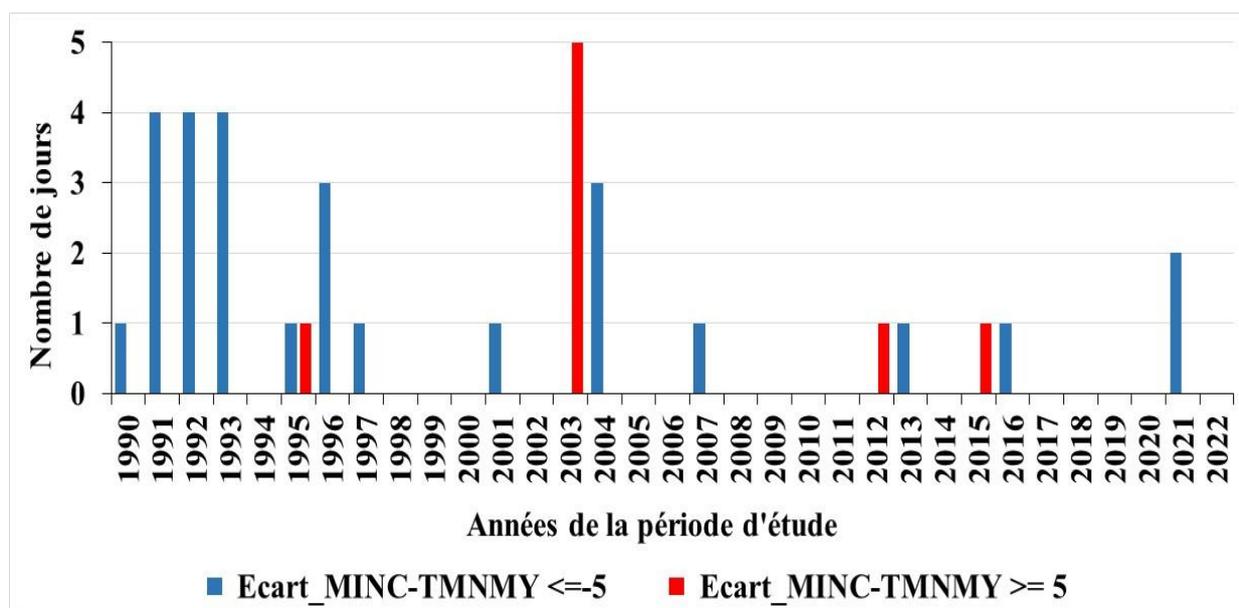
Si on considère l'écart des températures maximale et minimale avec les normales du mois, d'autres constatations peuvent être tirées. En effet, l'écart de  $5^\circ\text{C}$  de part et d'autre de la normale du mois de  $T_x$  fait apparaître des années où des jours du mois de juillet étaient en dessous de la normale du mois ( $5^\circ\text{C}$  de moins). Ils sont au nombre de 64. Ceux qui sont au-dessus de la

normale du mois de juillet sont plus fréquents (111 jours). Ils concernent toute la période sauf pour 1992 et 2004. Les années de 2009 à 2022 s'individualisent par un nombre plus important de jours où on enregistre un écart entre Tx et la température maximale moyenne  $\geq 5$ . 2009, 2011, 2012, 2014, 2017, 2019, 2021 et 2022 en sont les mieux représentatives de cette situation. La deuxième moitié de la période considérée (2007 à 2022) somme une fois et demi, par rapport à la première moitié de la période, le nombre de jours où l'écart entre Tx et la température maximale moyenne  $\geq 5$ .

L'année 2003 s'individualise par des jours où même les températures minimales enregistrées excèdent la normale du mois (avec 5°C de plus) dans cinq cas (Fig. 3.11 et Fig. 3.12).



**Figure 3. 11. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tx et température maximale moyenne avec + ou - 5°C du mois de juillet (1990-2022)**  
(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)



**Figure 3. 12. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tn et température minimale moyenne avec + ou - 5°C du mois de juillet (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Pour la répartition des classes des états de l'atmosphère en fonction du nombre des dépassements du seuil de 5°C d'écart avec les normales de Tn et Tx, les informations tirées à partir des tableaux 3.4 et 3.10) indiquent une météo plus chaude (classe 1) au sein de laquelle on a enregistré 83 jours où Tx a dépassé la normale avec 5°C de plus. Dans cette classe (classe 1), on a enregistré aussi 3 jours (16/07/2003, 23/07/2003 et 11/07/2012) où Tn a dépassé à son tour la normale du mois avec au moins 5°C de plus.

**Tableau 3. 10. Ecart à la normale (+ ou - 5°C) du mois de juillet pour Tx et Tn et par classe**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classes	Ecart_MAXC-TMXMY <= -5	Ecart_MAXC-TMXMY >= 5	Ecart_MINC-TMNMV <= -5	Ecart_MINC-TMNMV >= 5
Classe 1	0	83	0	3
Classe 2	0	28	12	5
Classe 3	64	0	15	0
<b>Total général</b>	<b>64</b>	<b>111</b>	<b>27</b>	<b>8</b>

La classe 2 avec une météo moins chaude et plus humide est répartie de façon assez homogène sur les jours du mois et sur la période considérée. Elle se caractérise des vitesses de

vent plus importantes et par des amplitudes thermiques et des écarts aux normales du mois de juillet nettement moins importants (dont leurs moyennes sont négatives), notamment entre Tx et la normale de Tx. Dans cette classe, les Tx journalières n'atteignent pas les 45°C.

L'effectif de la classe 3 est le plus important (553 observations). Elle prend plus d'ampleur dans la deuxième moitié de la période considérée et dans la deuxième moitié du mois de juillet (158 observations du 16-31 du mois et de 2006-2022). Cette classe se caractérise par une moyenne d'écart entre la température maximale et la normale du mois moins importante que la première et la deuxième classe (-2,7°C) et une humidité plus importante. Elle n'enregistre pas de cas où Tx a atteint ou a dépassé les 35°C.

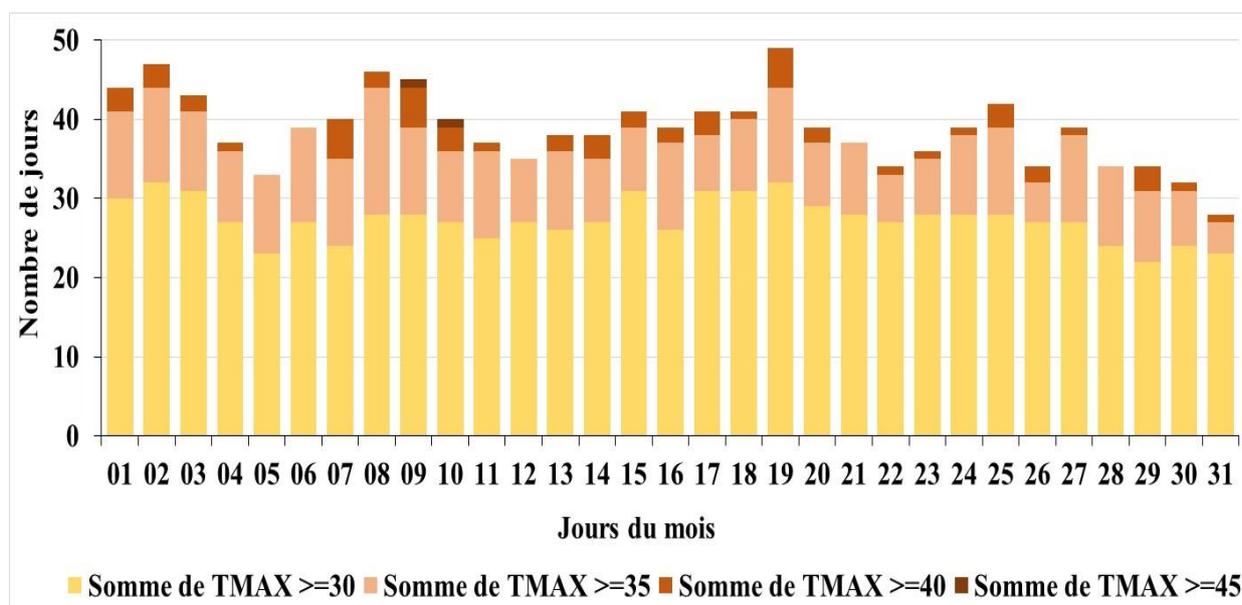
### **2.3- Statistiques de dépassement des seuils pour le mois d'août**

Tout au long de la période considérée des 33 années, on a enregistré le dépassement de Tx du seuil de 30°C pendant 20 jours ou plus (par mois) dans 91% des observations (les 9% restantes concernent 2002, 2005 et 2006 où ce dépassement est enregistré dans moins de 20 jours par mois).

Pour le seuil de  $T_x \geq 35^\circ\text{C}$ , le 1/3 de la période considérée a enregistré ce dépassement pendant 10 jours (par mois) ou plus.

Pour celui de 40°C, Tx a dépassé ce seuil dans 60% des cas de la série d'années considérées. En considérant ce dépassement, deux suites d'années s'individualisent par leurs étendues : 2002-2005 et 2019-2022. Pour les autres années, elles sont entrecoupées par des ruptures où Tx n'a pas dépassé les 40°C.

Sur toute la période considérée, deux jours seulement ont enregistré un dépassement de Tx du seuil de 45°C (le 09/08/1999 et le 10/08/2021) (Fig. 3.13).



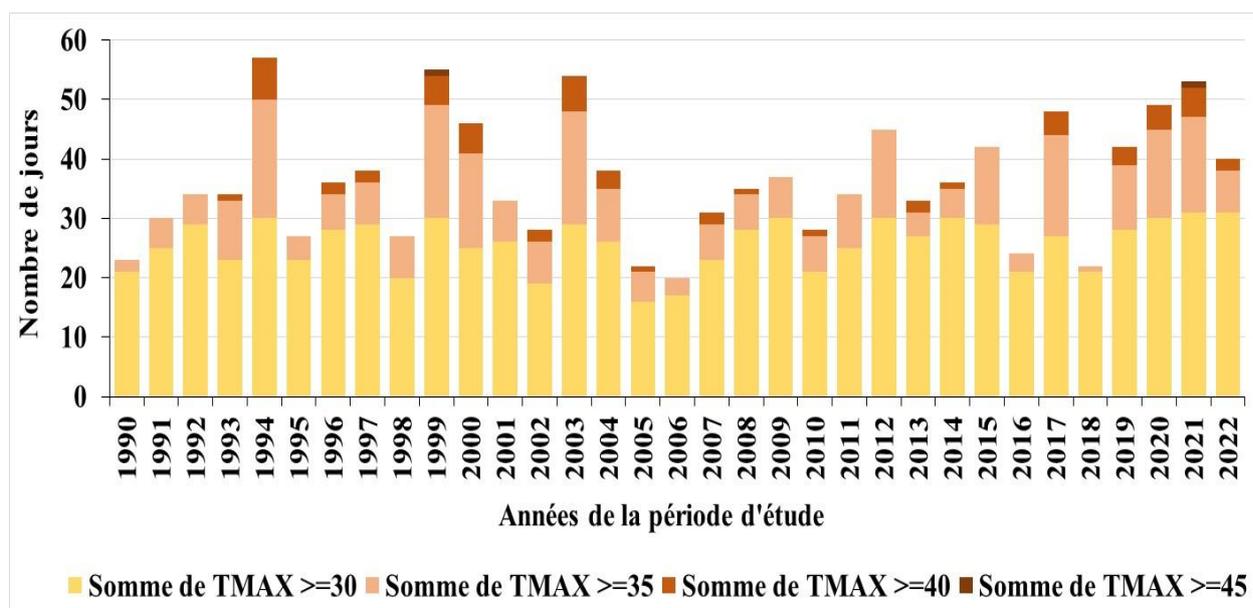
**Figure 3. 13. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C pour le mois d’août par jour (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Par année (Fig. 3.14), mis à part 2002, 2005 et 2006, le nombre de jours de dépassements de Tx du seuil de 30°C oscille entre 20 et 31. Il y a sept groupes d’années consécutives où on a 25 jours ou plus de dépassement du seuil de 30°C (1991-1992, 1996-1997, 1999-2001, 2003-2004, 2008-2009, 2011-2015 et 2019-2022 avec aussi 1994 et 2017). Dans cinq de ces groupes, on a des dépassements de Tx de 35°C dans plus de 10 jours. Il s’agit en détail des années 1999-2000, 2003, 2012, 2015, 2017, 2019-2021). Le seuil de 40°C est atteint dans 59 cas durant la période considérée. Les séries d’années les plus longues, où on enregistre ce dépassement pour le mois d’août, sont 2002-2005 et 2019-2022.

C’est pendant le mois d’août de l’année 2021 que la température maximale a atteint les 45°C. Il s’agit du 10 août 2021<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> Tx a atteint et a dépassé les 45°C en milieu de la journée du 10/08/2021 (de 11h à 14h selon la même source : INM-METAR). Elle a même atteint 48°C à midi. Il s’agit d’une journée de sirocco (vent du Sud) entre 4,5 m/s et 6 m/s avec un ciel clair, un air sec (Humidité relative de 10% et une température de point de rosée de 8 °C), une visibilité horizontale de 9 à 10 km et une pression atmosphérique ramenée au niveau de la mer égale à 1014hPa.



**Figure 3. 14. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C, 40°C et 45°C pour le mois d’août par année (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Durant ce mois d’août, on a enregistré plusieurs séquences de jours successifs de dépassement du seuil de Tx de 40°C. Le détail est donné dans le tableau 3.11 :

**Tableau 3. 11. Séquence de jours successifs où Tx >= 40°C pendant le mois d’août**

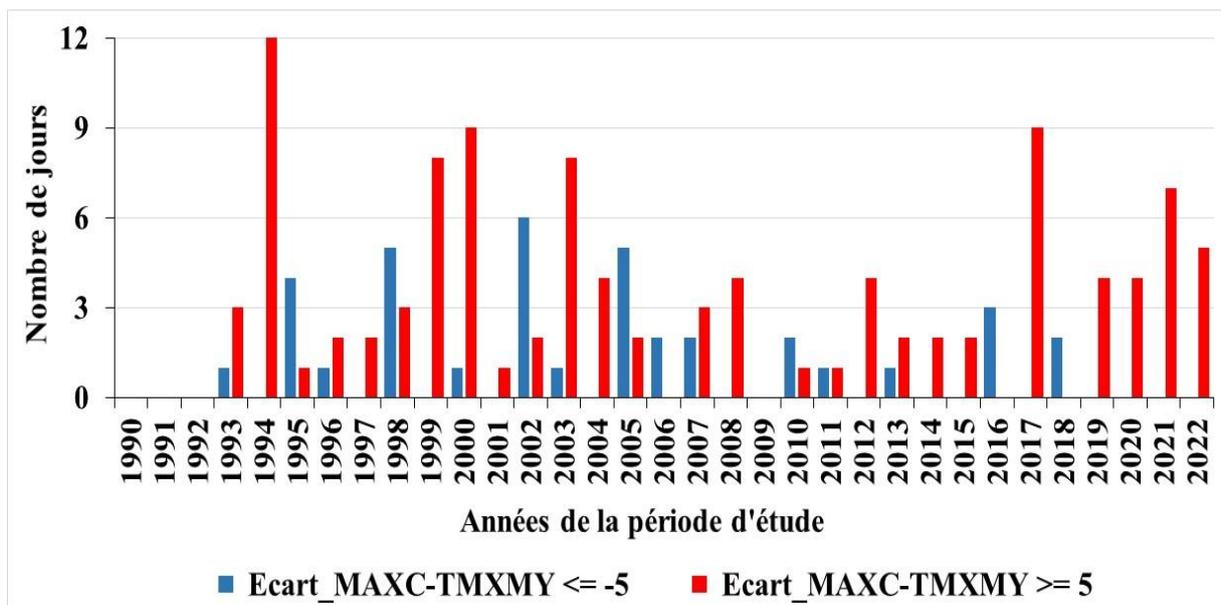
(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année	Séquence de jours successifs de dépassement Tx >= 40°C			Nombre de jours
1994	13-14-15 du mois			3
	41°C	41,77°C	43,22°C	
1997	8-9 du mois			2
	40,61°C	42,11°C		
1999	19-20 du mois			2
	44,38°C	43°C		
2000	25-26 du mois			2
	41°C	40,50°C		
2002	02-03 du mois			2
	42,50°C	44,22°C		

Année	Séquence de jours successifs de dépassement $T_x \geq 40^\circ\text{C}$				Nombre de jours
2003	16-19 du mois				4
	40,72° C	42°C	40,11° C	40°C	
2007	29-30 du mois				2
	43,39°C		41,61°C		
2017	02-04 du mois				3
	40°C	40°C	41,61°C		
2019	01-02 du mois				2
	42°C		41,39°C		
2020	13-14 du mois				2
	42°C		41,22°C		
2021	09-11 du mois				3
	42°C	48,89°C	43°C		

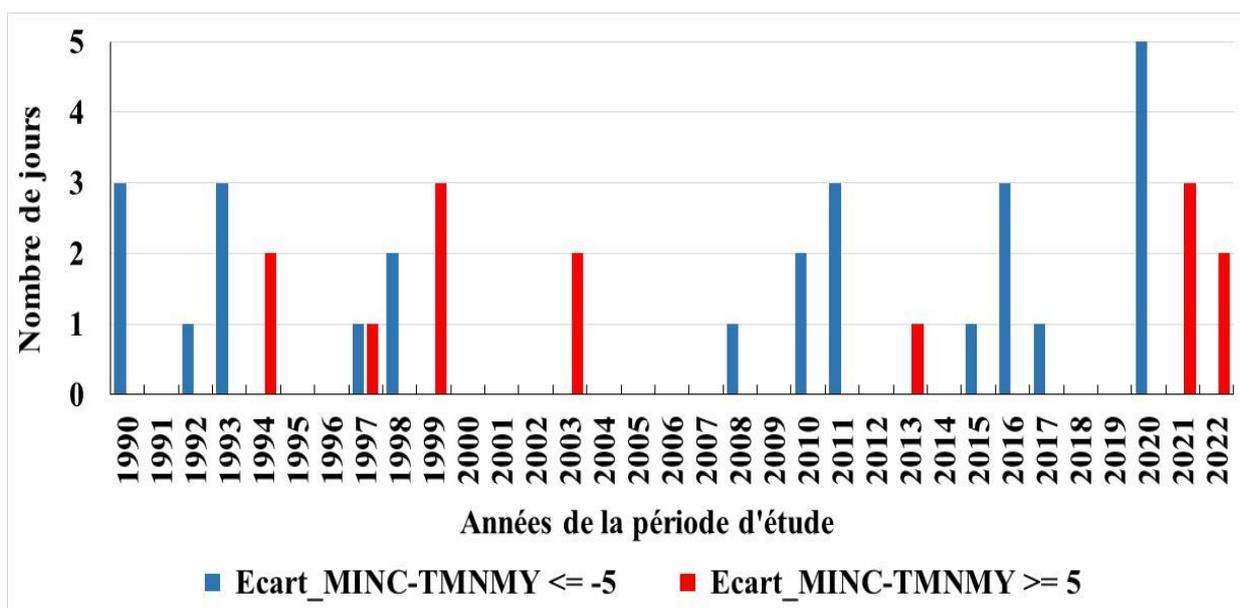
Pour le mois d'août, il y a moins de jours (37 cas), que les mois de juin et juillet, où on enregistre un écart de la température maximale avec la normale du mois  $< -5^\circ\text{C}$  (la formule est  $T_x$  - température maximale normale du mois). Aucun jour relevant cet écart n'a été enregistré entre 2020-2022. Le nombre de jours où cet écart atteint ou dépasse les  $5^\circ\text{C}$  est légèrement moins important. Cependant, on enregistre pendant le mois d'août, tout au long de la période considérée, des séries d'années plus longues où cet écart  $\geq 5^\circ\text{C}$ . 57 jours entre 1993-2005, 12 jours entre 2010-2015 et 20 jours entre 2019-2022.

Les années 1994, 1997, 1999, 2003, 2013, 2021 et 2022 s'individualisent par un écart entre  $T_n$  et la normale du mois d'août qui atteint ou dépasse les  $5^\circ\text{C}$ . Les mois d'août des années 2021 et de 2022 sont les plus chauds (Fig. 3.15 et Fig. 3.16).



**Figure 3. 15. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tx et température maximale moyenne avec + ou - 5°C du mois d'août (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)



**Figure 3. 16. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre Tn et température minimale moyenne du mois d'août avec + ou - 5°C du mois d'août (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Pour la répartition des classes des états de l'atmosphère en fonction du nombre des dépassements du seuil de 5°C d'écart avec les normales de Tn et Tx, les informations tirées à partir des tableaux 3.5 et 3.12) indiquent une météo plus chaude pour la classe 3 au sein de laquelle on a enregistré 98 jours où Tx a dépassé la normale avec 5°C de plus. Dans cette classe

(classe 3), on a enregistré aussi 14 jours où Tn a dépassé à son tour la normale du mois avec au moins 5°C ou plus.

**Tableau 3. 12. Ecart à la normale (+ ou - 5°C) du mois d'août pour Tx et Tn et par classe**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classes	Ecart_MAXC-TMXMY <= -5	Ecart_MAXC-TMXMY >= 5	Ecart_MINC-TMNMY <= -5	Ecart_MINC-TMNMY >= 5
Classe 1	32	0	0	0
Classe 2	5	7	26	0
Classe 3	0	98	0	14
<b>Total général</b>	<b>37</b>	<b>105</b>	<b>26</b>	<b>14</b>

La classe 2 avec une ambiance moins chaude et moins sèche est répartie de façon assez homogène sur les jours du mois et sur la période considérée. Elle se caractérise par des amplitudes thermiques légèrement plus importantes, mais des écarts aux normales thermiques du mois nettement moins importants (la moyenne de cet écart est de -0,4°C). Dans cette classe, Tx oscille entre 27,89°C et 39,11°C. Aussi, on ne trouve pas dans cette classe des écarts entre Tn et la normale du mois qui atteint ou dépasse les 5°C.

La classe 1 est caractérisée par une météo plus fraîche avec des écarts nettement plus importants, de 5°C de moins, entre Tn et Tx par rapport aux normales du mois. En détail elle englobe 37 cas où Tx - température maximale moyenne <= -5°C et 16 cas où Tn - température minimale moyenne <= -5°C.

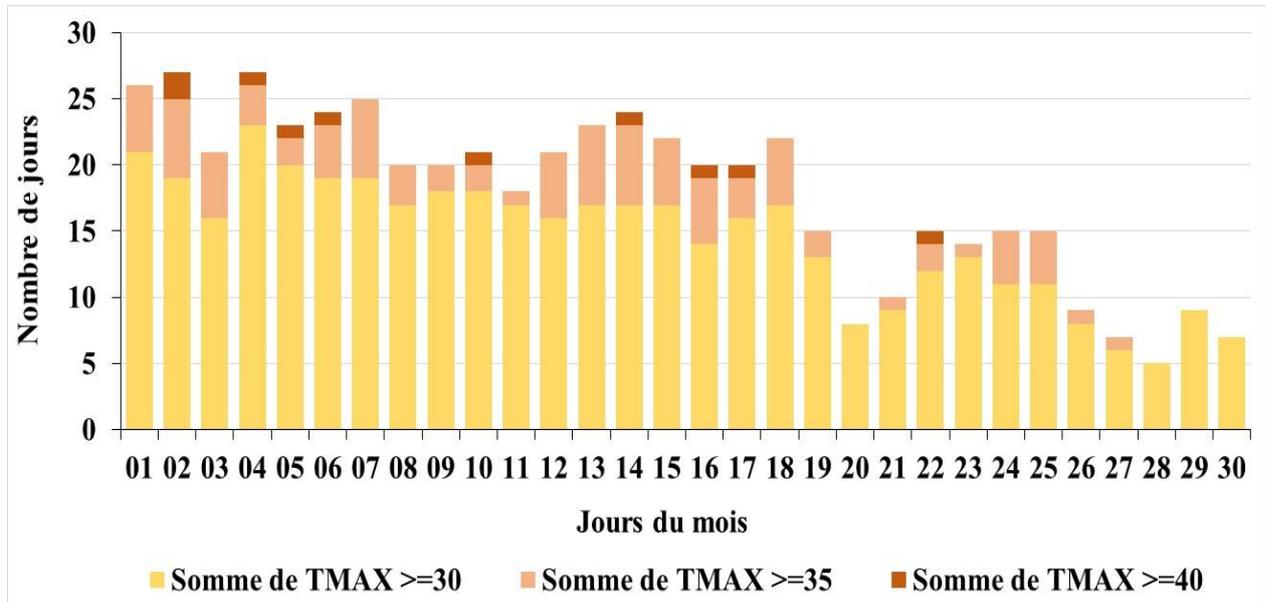
La classe 3, avec une météo plus chaude, occupe plus la première moitié du mois d'août, alors que la classe 1, avec une météo plus fraîche, occupe plus la deuxième moitié du mois.

Ceci s'explique par le fait que les conditions atmosphériques de la classe 3 du mois d'août (qui occupe plus la 1<sup>ère</sup> moitié du mois) sont, en fait, la continuité de celles de la classe 1 du mois de juillet qui a des conditions atmosphériques plus chaudes (qui occupe plus la 2<sup>ème</sup> moitié du mois).

#### 2.4. Statistiques de dépassement des seuils pour le mois de septembre

Les statistiques du mois de septembre ont montré que 44 % des jours de ce mois durant la période considérée ont enregistré un dépassement de Tx du seuil de 30°C, 9% pour le seuil de 35°C, 1% pour le seuil de 40°C et aucun dépassement du seuil de 45°C (Fig. 3.17). Sur les 33 années considérées, 75% ont un cumul de 10 jours ou plus (par mois) de dépassement des 30°C et 18% ont un cumul de 20 jours ou plus). Pour le seuil de 35°C, on n'a pas enregistré un cumul

de dépassement des 35°C qui atteint les 10 jours et seulement 21% ont un cumul de 5 jours ou plus.



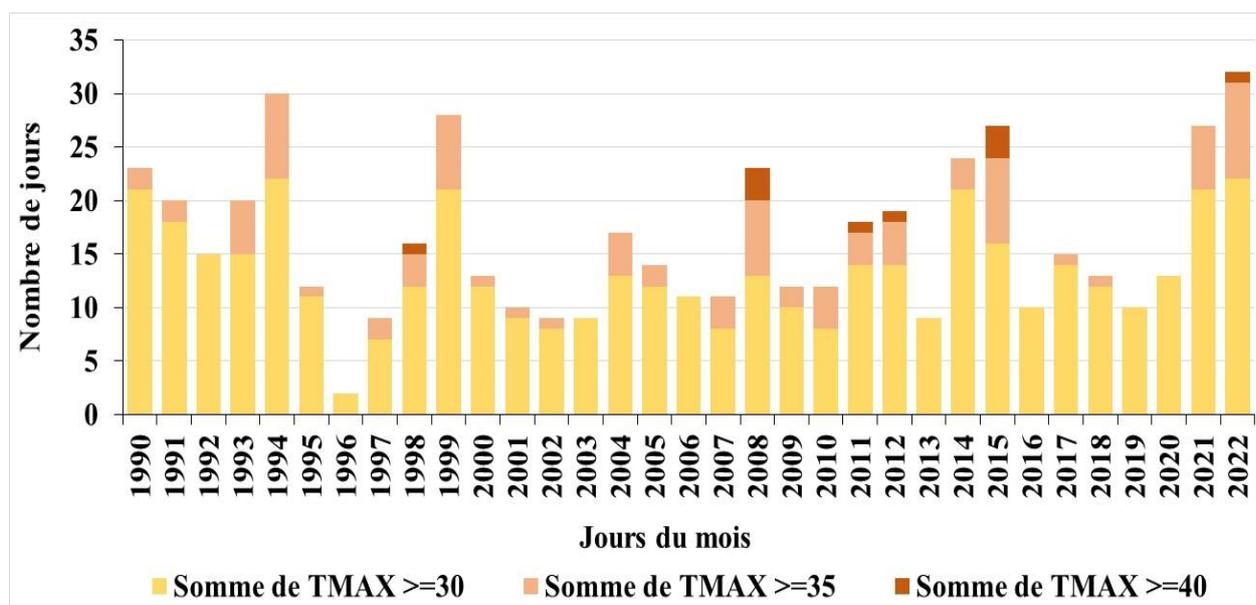
**Figure 3. 17. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C et 40°C pour le mois de septembre par jour (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année par année (Fig. 3.18), le nombre de jours de dépassements de Tx du seuil de 30°C oscille entre 2 et 22. On enregistre aussi six groupes d'années où le cumul de dépassement de Tx des 30°C atteint ou dépasse les 10 jours : 1990-1995, 1998-2000, 2004-2006, 2008-2009, 2011-2012 et 2014-2022. Les groupes les plus étendus sont le premier et le dernier dans lesquels on peut identifier deux groupes où le cumul de dépassement de Tx des 35°C atteint ou dépasse les 5 jours.

C'est pendant le mois de septembre de l'année 2011 que la température maximale a atteint les 43°C. Il s'agit du 02 septembre 2011<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> Tx a atteint et a dépassé les 40°C en milieu de la journée du 02/09/2011 (de 11h à 14h selon la même source : INM-METAR). Elle a atteint 43°C à 13h. Il s'agit d'une journée de sirocco (vent du Sud, 180°, puis du N-NE, 20°. Il s'agit d'un retour d'Est, voir la séquence des Archives des réanalyses ERA5 de ECMWF/CEP entre 0h et 18h) de vitesse entre 3 m/s et 5 m/s avec un ciel clair, un air sec (Humidité relative de 14% et une température de point de rosée de 8,2 °C), une visibilité horizontale de 7 à 8 km, un ciel et une pression atmosphérique ramenée au niveau de la mer égale à 1012hPa.



**Figure 3. 18. Nombre de jours de dépassement de Tx des seuils de 30°C, 35°C et 40°C pour le mois de septembre par année (1990-2022)**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Durant ce mois de septembre, on a enregistré deux séquences de jours successifs de dépassement du seuil de Tx de 40°C (Tab. 3.13). Il s’agit en détail du 5-6 septembre 2008 et 16-17 septembre 2015.

**Tableau 3. 13. Séquence de jours successifs où Tx >= 40°C pendant le mois de septembre**

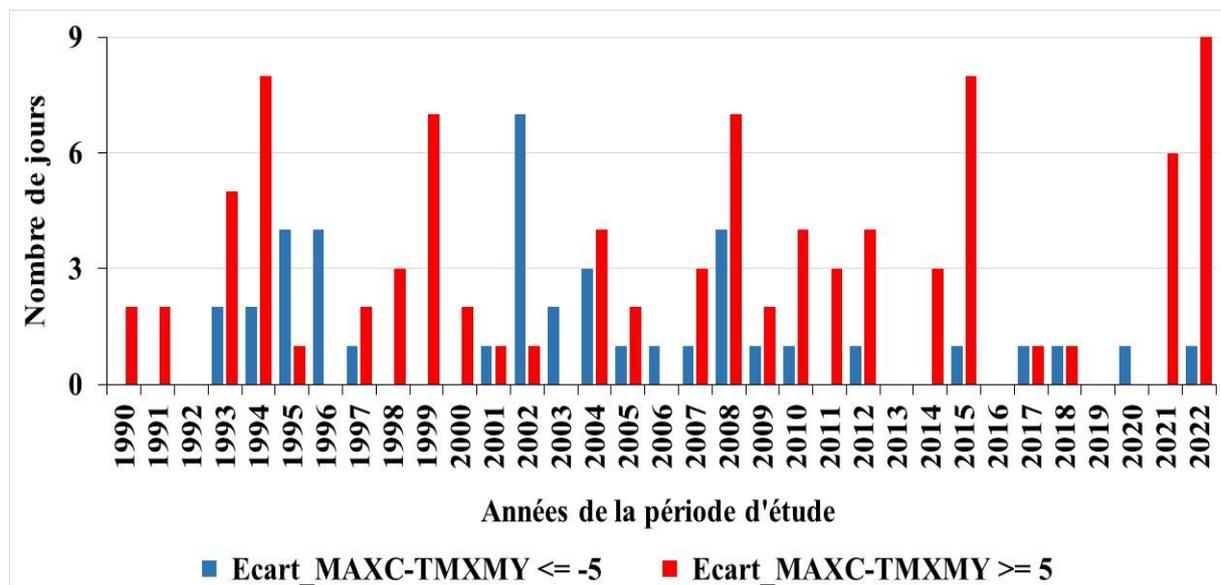
(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année	Séquence de jours successifs de dépassement Tx >= 40°C		Nombre de jours
2008	5-6 du mois		2
	40°C	40°C	
2015	16-17 du mois		2
	42,28°C	40,61°C	

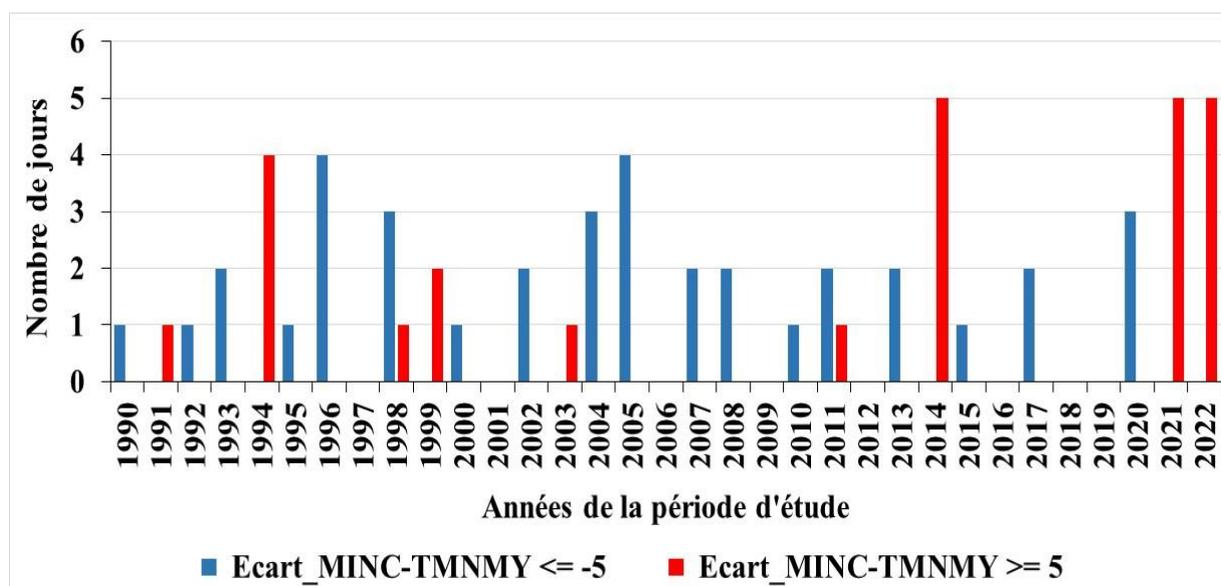
Pour le mois de septembre, les fréquences de dépassement de Tn et Tx aux normales du mois avec 5°C ou plus sont plus proches de celles du mois d’août. Cependant, elles sont plus importantes pour les valeurs de 5°C ou plus en dessous des normales et moins importantes pour les valeurs de 5°C ou plus au-dessus des normales (Fig. 3.19 et Fig. 3.20).

La première moitié de la période considérée enregistre plus d’occurrences où l’écart entre Tx et la température maximale moyenne du mois est <= 5°C. Elle enregistre moins d’occurrences où l’écart entre Tx et la température maximale moyenne du mois est >= 5°C.

C'est la deuxième moitié de la période considérée (à partir de 2007) qui enregistre plus d'occurrences dans cette dernière catégorie (51 de 2007-2022, dont 15 cas entre 2021 et 2022, contre 40 de 1990-2006). Cette même période (2007-2022) enregistre même 16 cas où l'écart entre  $T_n$  et la température minimale moyenne du mois est  $\geq 5^\circ\text{C}$  dont 10 cas partagés entre 2021 et 2022.



**Figure 3. 19. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre  $T_x$  et température maximale moyenne avec + ou  $- 5^\circ\text{C}$  du mois de septembre (1990-2022)**  
(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)



**Figure 3. 20. Nombre de jours de dépassement de l'écart entre  $T_n$  et température minimale moyenne avec + ou  $- 5^\circ\text{C}$  du mois de septembre (1990-2022)**  
(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Pour la répartition des classes des états de l'atmosphère en fonction du nombre des dépassements du seuil de 5°C d'écart avec les normales de Tn et Tx, les informations tirées à partir des tableaux 3.6 et 3.14 indiquent une ambiance plus chaude et plus sèche pour la classe 1 (qui occupe plus la première moitié du mois de septembre) au sein de laquelle on a enregistré 75 jours où Tx a dépassé la normale avec 5°C de plus. Dans cette classe (classe 1), on a enregistré aussi 23 jours où Tn a dépassé à son tour la normale du mois avec au moins 5°C de plus.

**Tableau 3. 14. Ecart à la normale (+ ou - 5°C) du mois de septembre pour Tx et Tn et par classe**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classes	Ecart_MAXC-TMXMY <= -5	Ecart_MAXC-TMXMY >= 5	Ecart_MINC-TMNMV <= -5	Ecart_MINC-TMNMV >= 5
Classe 1	0	75	0	20
Classe 2	0	16	0	5
Classe 3	41	0	37	0
<b>Total général</b>	<b>41</b>	<b>91</b>	<b>37</b>	<b>25</b>

La classe 2 avec une météo légèrement moins chaude et moins sèche est répartie de façon assez homogène sur les jours du mois et sur la période considérée. Elle se caractérise par des amplitudes thermiques moins importantes, mais des écarts aux normales thermiques du mois nettement moins importants. Dans cette classe, Tx oscille entre 27,5°C et 32,78°C. Aussi, on trouve dans cette classe seulement 05 cas où des écarts entre Tn et la normale du mois qui atteint ou dépasse les 5°C, mais aucun cas où ces écarts sont <=-5°C.

La classe 3 est caractérisée par une météo plus fraîche avec des écarts nettement plus importants, de 3,8°C de moins, entre Tn et Tx par rapport aux normales du mois. En détail elle englobe 41 cas où Tx - température maximale moyenne <= -5°C et 37 cas où Tn - température minimale moyenne <= -5°C. Cette classe occupe plus la deuxième moitié du mois de septembre.

Ceci s'explique par le fait que les conditions atmosphériques de la classe 3 du mois de septembre est, en fait, une continuité de la classe 1 du mois d'août (plus fraîche du mois qui occupe plus la 2<sup>ème</sup> moitié du mois). Les conditions atmosphériques du mois de septembre tendent vers la fraîcheur qui commence à se faire sentir.

Cette fraîcheur reste relative car même au cours du mois de décembre 2022 le beau temps règne encore et les gens ont en bien profité.

La comparaison entre les écarts à la normale (+ ou - 5°C) des mois de juin à septembre pour Tx et Tn révèle que c'est le mois de juin qui s'écarte le plus par rapport aux normales thermiques du mois (en dessous ou en dessus) durant la période 1990-2022. Ceci montre que les caractéristiques thermiques du mois de juin sont moins stables (136 cas où les Tn et Tx sont  $\leq -5^\circ\text{C}$  par rapport aux normales (c'est-à-dire plus frais) du mois et 155 cas où Tn et Tx sont en dessus des normales avec  $+5^\circ\text{C}$ , c'est-à-dire plus chaud). Les écarts de + ou - 5°C par rapport aux normales des Tn et Tx sont moins importantes pour les autres mois considérés. Le mois d'août reste le plus stable de point de vue caractéristiques thermiques, notamment Tn et Tx, avec 182 cas d'écart avec + ou - 5°C répartis au profit d'une ambiance plus chaude (qui est presque le double de l'ambiance plus fraîche du mois) par rapport aux normales (Tab. 3.15).

**Tableau 3. 15. Comparaison entre les écarts à la normale (+ ou - 5°C) des mois de juin à septembre pour Tx et Tn**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Mois	Ecart_MAXC-TMXMY $\leq -5$	Ecart_MAXC-TMXMY $\geq 5$	Ecart_MINC-TMNY $\leq -5$	Ecart_MINC-TMNY $\geq 5$	Total $\leq -5^\circ\text{C}$	Total $\geq 5^\circ\text{C}$
<b>Juin</b>	<b>94</b>	<b>125</b>	<b>42</b>	<b>30</b>	<b>136</b>	<b>155</b>
<b>Juillet</b>	<b>64</b>	<b>111</b>	<b>27</b>	<b>8</b>	<b>91</b>	<b>119</b>
<b>Aout</b>	<b>37</b>	<b>105</b>	<b>26</b>	<b>14</b>	<b>63</b>	<b>119</b>
<b>Septembre</b>	<b>41</b>	<b>91</b>	<b>37</b>	<b>25</b>	<b>78</b>	<b>116</b>

## Conclusion

Nous avons classé les états de l'atmosphère en se référant principalement aux températures, converties en anomalies pour la saison chaude de la période 1990-2022. La CAH donne trois classes : une première classe très chaude, une deuxième avec des valeurs proches de la normale et une troisième classe avec des ambiances thermiques fraîches. Les principaux types de temps ont été identifiés pour la période 1990-2022, fondés sur l'état moyen de l'atmosphère et la circulation atmosphérique. Pour chaque type, nous connaissons les fréquences de son apparition et les caractéristiques des masses d'air qui lui sont associées.

La même démarche a été appliquée à une échelle temporelle plus fine (par mois). Elle a abouti aux mêmes résultats.

C'est le mois d'août qui s'identifie par le nombre le plus important des jours de sirocco et la fréquence la plus importantes des brises de mer, mais c'est pendant le mois de juin qu'on a

enregistré la séquence de jours successifs de sirocco la plus longue (05 jours de suite) de la période 1990-2022. La température la plus importante pendant un sirocco a été enregistrée pendant le mois d'août (48,8°C).

**CHAPITRE 4**  
**BRISES THERMIQUES À BIZERTE : APPROCHE**  
**MULTISCALE**

Certains types de vents peuvent résulter des caractéristiques géographiques locales. Les brises de terre et de mer en sont des exemples sur les zones côtières. Elles sont engendrées par la différence de pression résultante du contraste thermique entre la surface de la terre et la surface de la mer (Simpson, 1994).

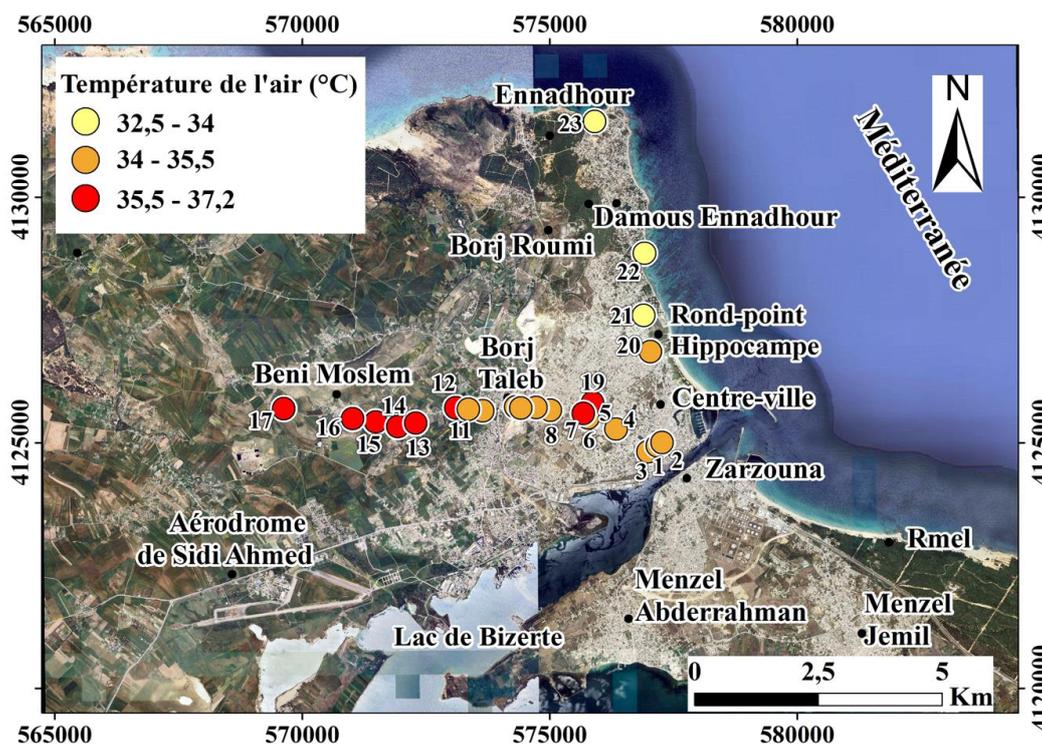
Bizerte, ville de la rive sud de la Méditerranée, enregistre, par temps radiatif avec un vent faible et un ciel clair, des circulations aérologiques alternées commandées par la mer, la terre, la montagne et le lac (Dahech et Charfi, 2017) qui pourraient avoir des conséquences majeures sur la dispersion et la concentration des polluants atmosphériques à l'échelle de la ville et ses environs.

Dans ce qui suit, nous présentons une étude multiscalaire des brises thermiques à Bizerte dans le but d'identifier les paramètres et facteurs qui influencent leurs caractéristiques à cette agglomération.

### **1. Organisation spatiale de la température de l'air à Bizerte**

Deux facteurs essentiels régissent la variabilité spatiale des températures de l'air pendant la journée. Premièrement, le littoral est plus frais que le reste des espaces ; car la brise de mer, quand elle est active (notamment pendant le jour), limite la hausse de la température sur la bande côtière par rapport à l'intérieur. Deuxièmement, la nature de l'occupation du sol où les zones végétalisées (essentiellement les forêts) semblent bénéficier du facteur adoucissant de ce microclimat.

Les mesures semi-itinérantes effectuées les 16,17 et 18 août 2022 à midi, nous ont permis de déceler des températures moins élevées au centre-ville de Bizerte par rapport à l'arrière-pays, comme à Beni Moslem (Fig. 4.1). Durant cette campagne les températures les moins élevées ont été observées dans des sites bien ventilés par la brise de mer (au bord de la mer : zone de Corniche) où une différence d'environ 2,5°C est relevée par rapport à Beni Moslem situé à l'intérieur et pas encore atteinte par la brise littorale à l'heure de la mesure.



**Figure 4. 1. Carte des températures relevées lors de la campagne de mesures semi-itinérantes du 17 août 2022 à 12h00 dans l'agglomération de Bizerte et ses environs**

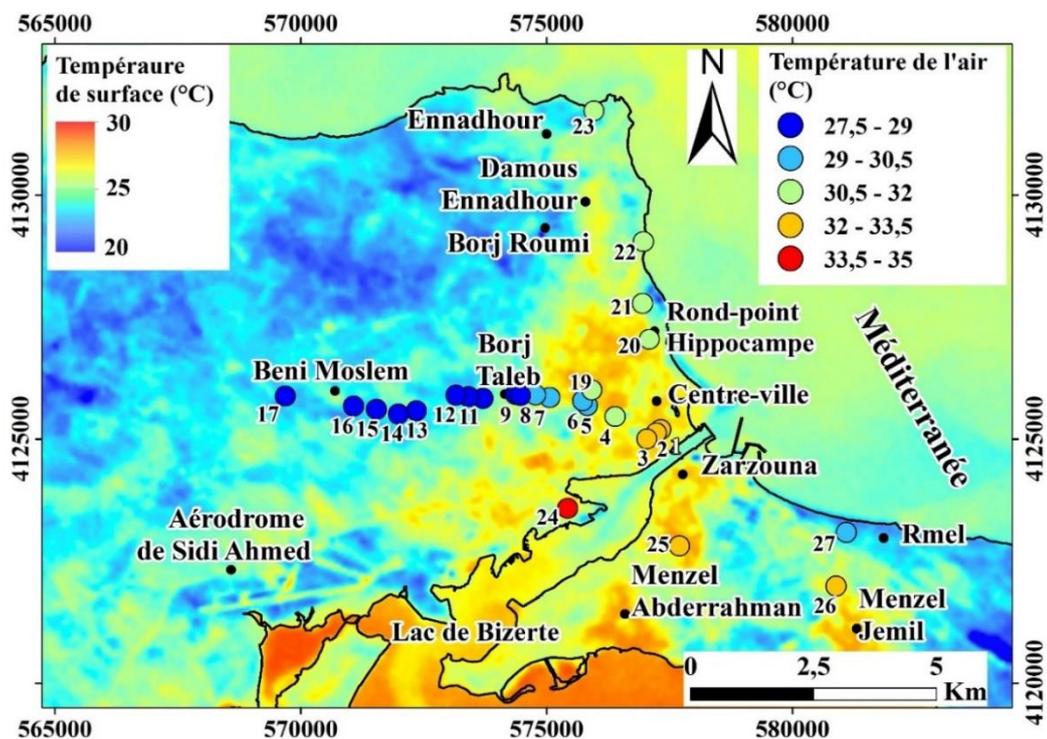
(Campagne de mesure dans l'agglomération de Bizerte et Google Earth)  
 (Les chiffres en haut du point indiquent les numéros des points)

L'examen des mesures semi-itinérantes (organisées pendant la saison chaude les 16,17 et 18 août 2022 à 00h par type de temps radiatif) à 1,20 m au-dessus du sol (27 points de mesure, Fig. 4.2) montre des variations des valeurs de température à Bizerte et ses environs et l'existence d'un îlot de chaleur sur les zones densément urbanisées, la nuit. La disparité spatiale des températures dans l'espace intra-urbain est modérée ( $\Delta = 1,2^{\circ}\text{C}$ ). Un îlot de chaleur relativement fort occupe la zone centrale densément urbanisée : la Médina, la ville européenne, les quartiers nord, Bizerte sud et Zarzouna. L'écart maximal par rapport à la campagne environnante atteint  $5^{\circ}\text{C}$ .

Une individualisation nette de la masse urbaine est observée par rapport aux espaces ruraux, mais plus difficilement une opposition de quartiers. À l'échelle de la zone agglomérée, les écarts restent inférieurs à  $2^{\circ}\text{C}$ . En effet, les espaces végétalisés et régulièrement arrosés constituent des îlots de fraîcheur en baissant la température d'environ 1 à  $2^{\circ}\text{C}$ , comme c'est le cas du point de mesure 5, bordée de part et d'autre par la végétation (cimetière des Martyrs), où nous avons enregistré  $29,7^{\circ}\text{C}$  contre  $32,5^{\circ}\text{C}$  au niveau du point de mesure 1, situé dans un tissu urbain dense (Rue Habib Bourguiba au nord de la Place Foch). Ceci est vrai aussi pour les stades de football situés en plein tissu urbain comme c'est le cas à Bizerte Nord, Zarzouna et Menzel

Abderrahman. Vers le nord, la mer paraît aussi comme un facteur de discrimination thermique en agissant par sa forte inertie thermique. Au niveau du point 22 sur la corniche de Bizerte, la température est de 31,5°C.

Vers l'ouest et le sud, la baisse de la température s'effectue d'une manière progressive. À l'extrême ouest (route de Beni Moslem : P16 et P17 où on a enregistré 27,5°C), la topographie encaissée est très favorable à l'installation des inversions thermiques par refroidissement radiatif et l'écoulement d'air froid (brise de vallée) en provenance des monts de Jbel Ennadour (Dahech et Charfi, 2017). Au sud, la forêt de Rmel (point 27) correspond à un îlot de fraîcheur en baissant la température de 2 à 4°C par rapport au centre-ville (ça diffère si on est sur le bord de la forêt ou si on est en milieu du bois).



**Figure 4. 2. Carte des températures de surface (Formule USGS) du 01/09/2015 à 22h10 (heure locale) avec les températures de l'air prise la nuit du 17/08/2022 à 23h45 (heure locale)<sup>19</sup>**

(Image Landsat 8 OLI-TIRS)

## 2. L'étude des brises à une méso-échelle : quels facteurs d'influence ?

Afin de sélectionner les jours de brise, des filtres ont été appliqués sur les données (Dahech *et al.*, 2012). Cette méthode est inspirée des travaux de Neumann et Mahrer (1971), Simpson

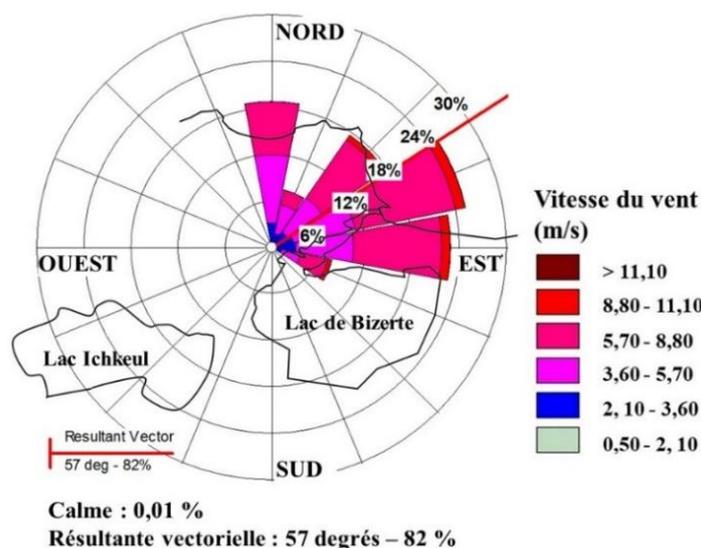
<sup>19</sup> Ne disposant pas d'une image Landsat 8 OLI-TIRS nocturne à la même date, nous avons opté à projeter les données des mesures semi-itinérantes nocturnes du 17/08/2022 à 23h45 (heure locale) sur la carte des températures de surface du 01/09/2015 à 22h10 (heure locale).

(1994), Planchon (1997), Borne *et al.*, (1998) et Dahech *et al.*, (2005). Il s'agit essentiellement « d'écarter les jours pluvieux, dépressionnaires et venteux. Les jours retenus sont ceux où les précipitations sont absentes, la pression est supérieure à 1007 hPa et la vitesse du vent maximal instantané est inférieure à 12 m/s venant de la composante nord et est (la mer) le jour et de la composante ouest et nord-ouest (le continent) la nuit » (Dahech et Charfi, 2017). A ceci s'ajoute, les jours où la brise de mer et celle de terre sont alternantes. Après vérification de leur qualité, ces données ont servi pour identifier les « configurations isobariques » qui ont donné lieu à des brises de mer, de terre, de montagne et de lac.

## 2.1. Fréquence mensuelle de la brise de mer, sa direction et sa vitesse mesurées à l'aérodrome de Sidi Ahmed

La brise littorale est un phénomène de « beau temps ». Elle est plus fréquente durant la saison chaude qui offre les conditions propices à son déclenchement, à savoir : vent synoptique faible, gradient thermique, entre terre et mer, plus important et stabilité atmosphérique. À Bizerte, ces conditions dominent en été avec l'installation fréquente des situations de marais barométrique (Dahech et Charfi, 2017).

En utilisant les filtres détaillés dans la partie méthodologie, la fréquence mensuelle des jours de brise avoisine les 70-82 % entre juin et septembre. Elle atteint son maximum pendant le mois d'août (Fig. 2.8). La fréquence de la brise de mer orientale est plus importante que celle septentrionale. Elles représentent respectivement 82 % et 18 % des brises de mer (Fig. 4.3).



**Figure 4. 3. Rose des vents montrant les directions des brises de mer septentrionales et orientales pendant la saison chaude (juin, juillet, août et septembre)**

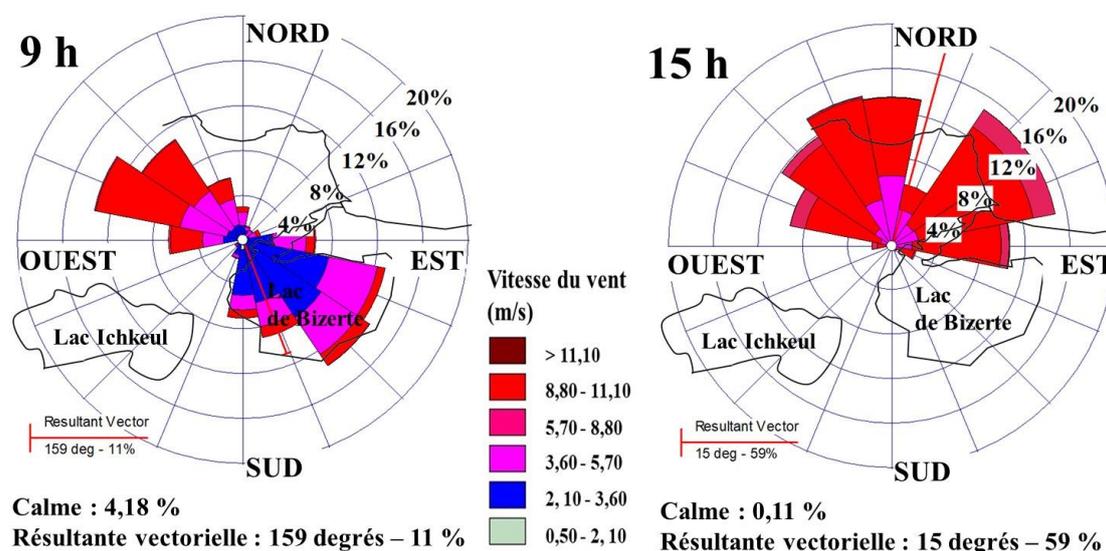
**de la période 1990-2022 à l'aérodrome de Sidi Ahmed à Bizerte**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

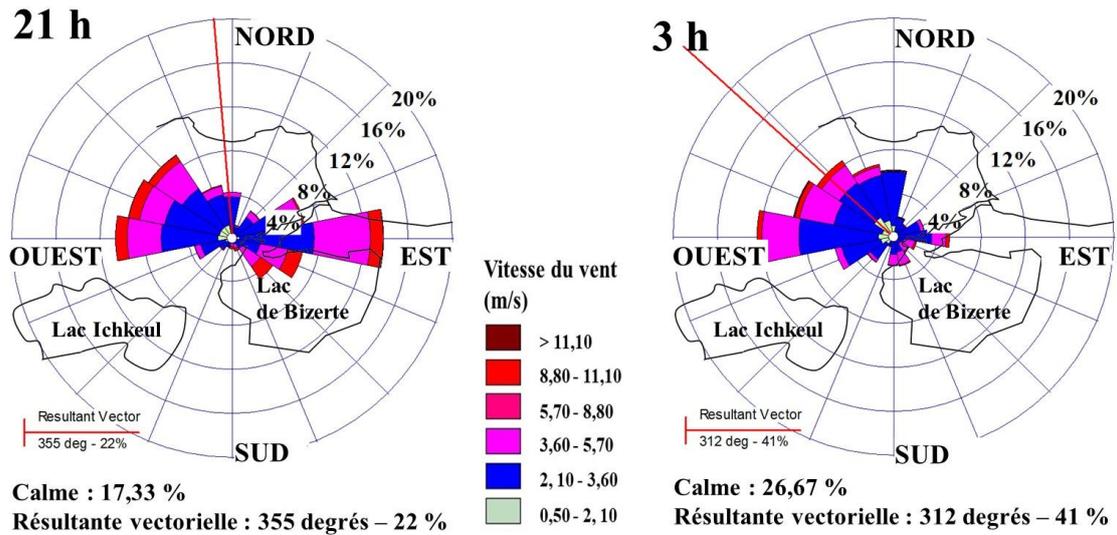
Les analyses des données du vent (vitesse et direction) de l'INM durant la période 1974-2013, entre juin et août et ponctuellement à 15h et 3h, donnent une idée sur la fréquence élevée du phénomène en été. Les vents soufflant de la mer à 15 h à une vitesse moyenne<sup>20</sup> (3-10 m/s) avoisinent les 70% à Bizerte et ce soit du quadrant septentrional, soit du quadrant oriental à une direction proche de la perpendiculaire à la côte (Dahech et Charfi, 2017).

La vitesse de la brise nocturne est faible et ne dépasse pas les 3 m/s. Elle souffle vers la mer (voir rose des vents de 3 h, Fig. 4.4 en bas à droite). Sous l'effet de la topographie, elle longe les basses plaines et les vallées situées à l'ouest de la station météorologique de l'aérodrome de Sidi Ahmed. À cause de la distance entre la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed et le lac (1 km au nord), d'une part, et la mer de l'autre (11,5 km), deux types de brises sont identifiées : une brise de terre soufflant vers le lac (vent de nord à nord-ouest) ou vers la mer (ouest à ouest sud-ouest). La brise de la mer est précédée par une brise de lac du sud-est d'une vitesse souvent inférieure à 4 m/s. Cette brise de lac représente environ 25% des situations de brise en été. Elle n'est observée que par temps calme (Fig. 4.4 à 9 h) (Dahech et Charfi, 2017).

Les roses du vent réalisées par Dahech et Charfi en 2018 à partir des données de la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed sur la période 1974 à 2013 ont été reprises pour couvrir la saison chaude de 1990 à 2022. Les différences apparaissent surtout aux niveaux des vitesses et des fréquences à 9h qui ont augmenté. Les roses de vent de 15h et 3h sont peu différentes (Fig. 4.4).



<sup>20</sup> Météo France, [http://files.meteofrance.com/files/glossaire/FR/glossaire/designation/658\\_curieux\\_view.html](http://files.meteofrance.com/files/glossaire/FR/glossaire/designation/658_curieux_view.html)



**Figure 4.4. Roses des vents par classes de vitesse enregistrés à 9h, 15h, 21h et 3h dans la station de Sidi Ahmed de Bizerte, durant la saison chaude (1990-2022)**<sup>21</sup>  
(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

## 2.2. Caractéristique de la brise près de la mer mesurée par les stations fixes supplémentaires DAVIS

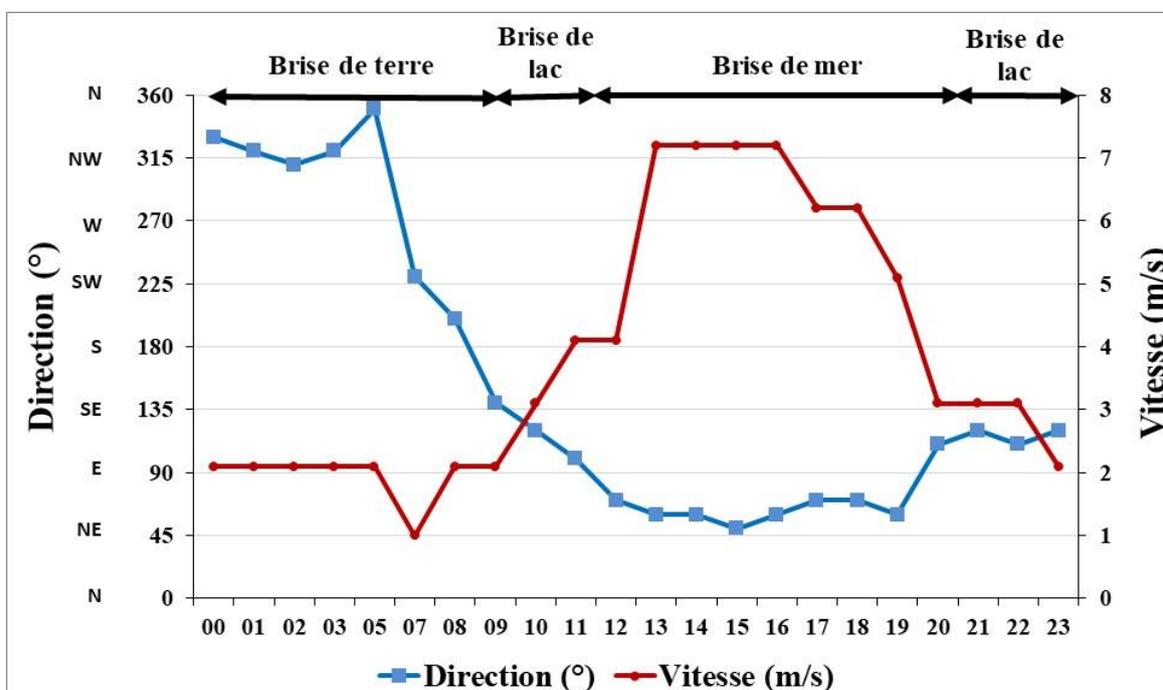
### 2.2.1. Exemple de l'épisode du 20 au 22 août 2012

Installée dans la zone de la corniche à Bizerte, l'analyse des données de la station météorologique fixe Davis a révélé des anémogrammes montrant plusieurs séquences de brise de mer dont la durée peut atteindre 12 jours de suite. Vu le pas de temps choisis lors de la configuration des paramètres de cette station (5 mn), ces graphiques montrent également les horaires précis de lever et de coucher de la brise. L'extrait des anémogrammes allant du 20 au 22 août 2012, à titre d'exemple, est typique : Il montre « *une brise de mer se levant vers 8h30, soit environ trois heures après le lever du soleil, et se couchant vers 21h, soit environ deux heures après le coucher du soleil* »<sup>22</sup> (Dahech et Charfi, 2017). De ce fait, sa durée au mois d'août avoisine 13 heures par jour. Sa vitesse maximale, qui frôle 7 m/s, est enregistrée vers 15 h. A cette heure-ci, elle souffle perpendiculairement au trait de côte, donc du secteur oriental conformément à ce qui a été mesuré par Dahech et Charfi (2017). Entre brise de mer et brise de terre, un temps de calme est observé (peut durer jusqu'à 3 heures). La vitesse de la brise de terre est faible et vient de l'ouest au nord-ouest. Il s'agit probablement d'un air frais qui s'écoule

<sup>21</sup> La résultante vectorielle (Resultant vector) indique la direction moyenne à partir de laquelle le vent a soufflé et l'amplitude du vecteur résultant est représentée par le nombre de fréquences.

<sup>22</sup> Temps nécessaire pour augmenter/perdre la température entre terre et mer et créer/diminuer ainsi le contraste thermique nécessaire pour le déclenchement/l'estompement de la brise de mer.

sur le versant oriental de Jbel Ennadhour culminant à environ 250 m d'altitude. Vu la distance qui sépare les deux stations (11,5 km), la brise de mer enregistrée le 22 août 2012 à la station fixe DAVIS du Corniche, ne parvient que vers midi à celle de l'aérodrome de Sidi Ahmed. Elle est précédée et succédée par une légère brise de provenance du lac de Bizerte soit du secteur sud-est (Fig. 4.5) (Dahech et Charfi, 2017).



**Figure 4. 5. Anémogramme montrant l'alternance entre brise de mer, brise de lac et brise de terre l'été à Bizerte à partir de l'exemple du 22 août 2012**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

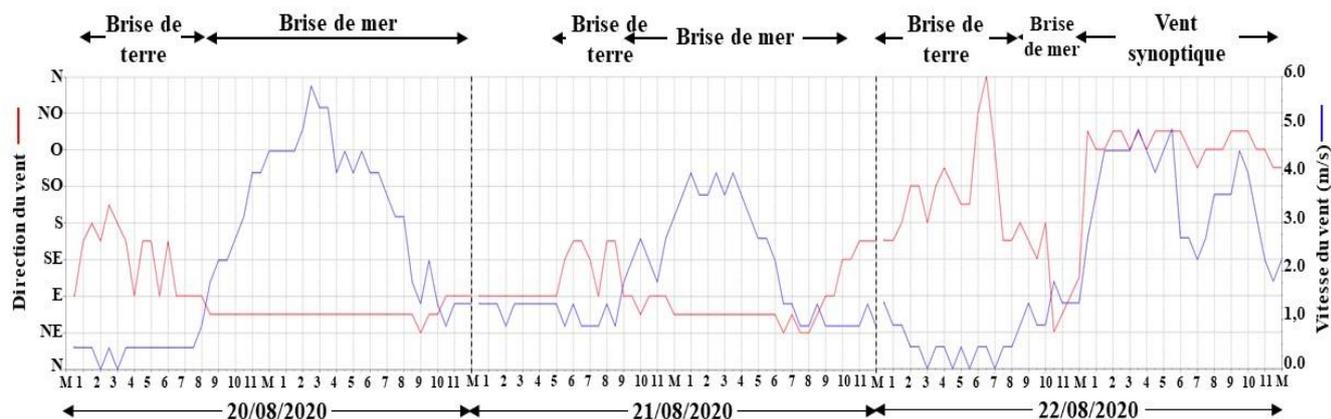
### 2.2.2. Exemple de l'épisode du 07 août au 21 septembre 2020

Dans le but de caractériser la situation météorologique du centre-ville de Bizerte et ses environs, une station DAVIS a été installée au Commissariat Régional de Développement Agricole de Bizerte (au centre-ville) et a fonctionné depuis 07 août jusqu'au 21 septembre 2020 (Fig. 4.6). Après avoir appliqué les filtres permettant de déceler les jours de brises (Dahech *et al.*, 2012), un schéma global ressemblant à celui généré par les données de 2012 peut être identifié.



**Figure 4. 6. Position de la station DAVIS installée au centre-ville de Bizerte (Siège du Commissariat Régional de Développement Agricole de Bizerte)**  
(Google Earth)

En détail, les conditions spécifiques de l'aérogologie et la répartition des champs thermiques et de pression entre terre et mer à Bizerte sont parfois différentes de ce schéma « typique ». Bien que l'heure de déclenchement de la brise de mer en été reste pratiquement la même : celle venant de la composante Est (vers 8h30) et celle venant de la composante nord (vers 12h00), l'heure à laquelle cette brise s'estompe peut aller de 21h00 jusqu'à minuit (Fig. 4.7). La station DAVIS installée au centre-ville (Commissariat Régional au Développement Agricole de Bizerte, CRDA) est située à quelques 750 m du canal (entrée du lac), le séparant de la mer, à quelques 900 m de la mer et à une distance de 5 Km de la plus proche étendue ouverte du lac. Pour cette raison, cette station est moins exposée aux influences aérogologiques du lac : la brise du lac n'est pas interceptée car elle est absente ou elle très oscillante. A travers l'exemple du 20 au 22 août 2020 (Fig. 4.7), à l'heure où la station météorologique de l'aéroport de Sidi Ahmed intercepte la brise du lac (6h-9h30) du sud-est, celle du centre-ville, se trouvant au nord-est du lac, intercepte la brise de terre qui est plus prononcée.



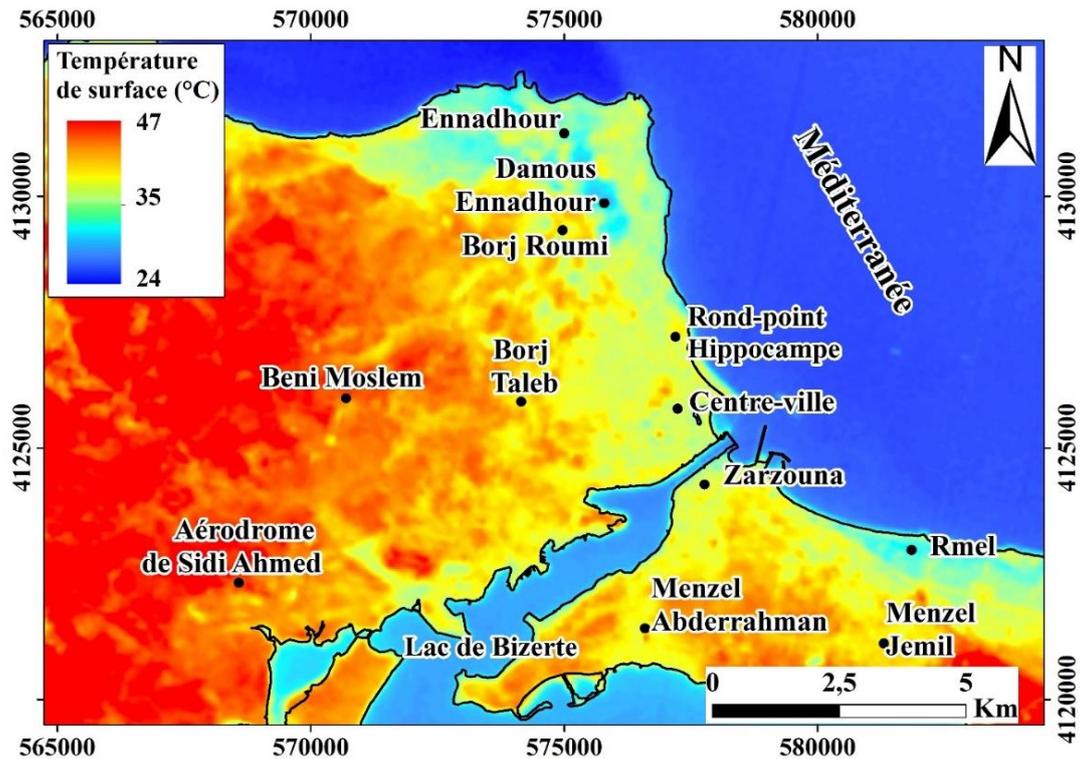
**Figure 4.7. Anémogrammes montrant l'alternance entre brise de mer et brise de terre l'été à Bizerte à partir de l'exemple du 20 au 22 août 2020**  
(Données de la station fixe DAVIS installée au CRDA de Bizerte)

Les contrastes thermiques entre frange côtière et arrière-pays de Bizerte d'une part, et entre terre et mer d'autre part sont perceptibles à travers les cartes des températures de surfaces. Le premier cas permet d'identifier un îlot de chaleur urbain, la nuit, et le deuxième cas permet d'identifier les orientations globales des brises diurnes, notamment celle de mer, notamment le jour.

En effet, la nuit, sur la carte des températures de surface du 01/09/2015 à 22h10 (heure locale) (Fig. 4.2), l'îlot de chaleur urbain commence à s'identifier dans les zones urbanisées de l'agglomération de Bizerte et de son arrière-pays. À cette heure-ci (heure de prise de l'image Landsat 8 OLI-TIRS, 01/09/2015 à 22h10, heure locale), le refroidissement de la surface de la terre n'est pas assez prononcé, une alternance de brise de terre et de mer est encore en place.

Aussi, nous avons procédé au calcul des températures de surface sur l'agglomération de Bizerte et ses environs pour la date du 30/07/2020 à 10h54 (heure locale)<sup>23</sup> (Fig. 4.8). À cette heure où la brise de mer est active, la carte réalisée montre clairement le contraste thermique terre-mer. L'importance de ce contraste apparaît aussi entre surface aquatique (la Méditerranée est plus fraîche que le lac de Bizerte et le lac d'Ichkeul). Les zones côtières et les forêts sont, de par leurs caractéristiques thermorégulatrices, sont moins chaudes que les zones à l'intérieure de la terre ferme. Ceci influence largement sur les directions et les vitesses des brises générées par ces différents contrastes.

<sup>23</sup> Cette carte a été réalisée en utilisant les deux bandes thermiques de LandSat 8 OLI-TIRS (bandes 10 et 11 d'une résolution spatiale de 100 m), ainsi que le NDVI du 30/07/2020 à 10h54 heure locale.



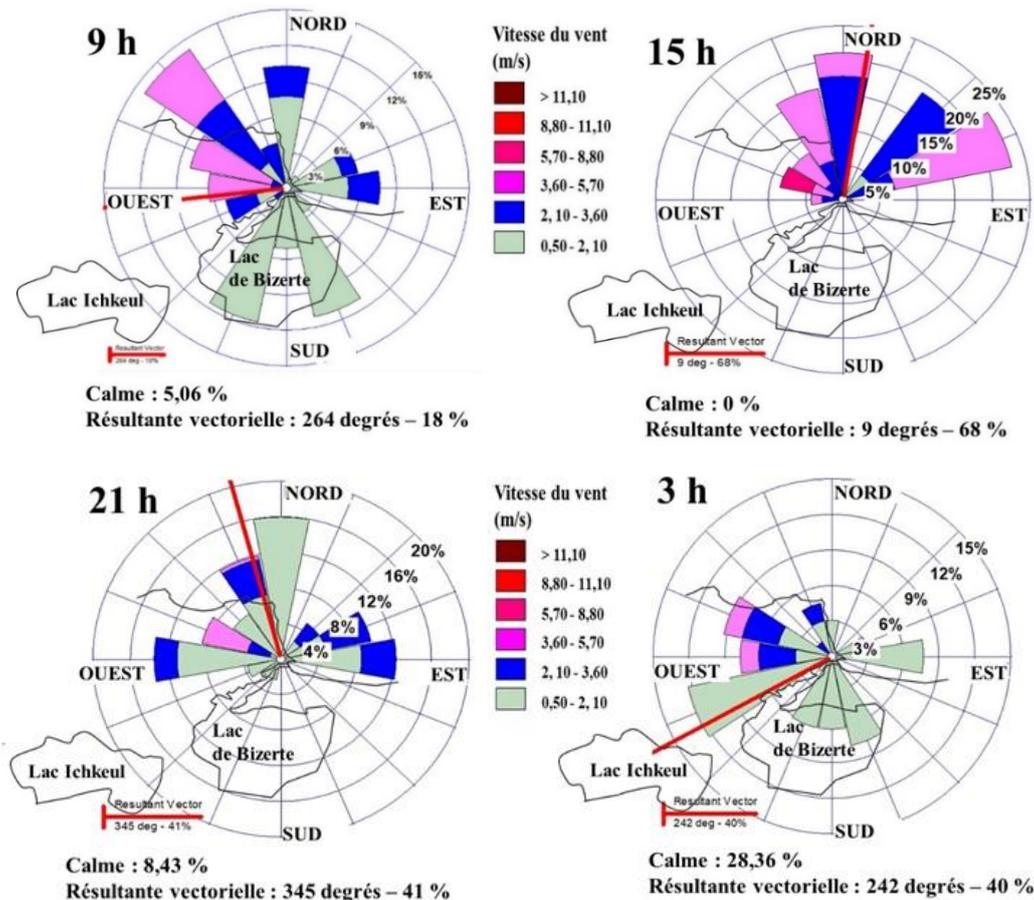
**Figure 4. 8. Carte des températures de surface du 30/07/2020 à 10h54 (heure locale)**  
(Image Landsat 8 OLI-TIRS)

Aussi, étant donné que les directions depuis lesquelles une brise de mer peut souffler sont du quart nord vers l'est, on peut dans plusieurs cas trouver entre l'heure habituelle de déclenchement qui est 8h30 et d'estompage qui est 21h, des vents soufflants de la composante ouest (qui est généralement empruntée par la brise de terre). L'explication de cette situation qu'on peut avancer est la suivante : à la même heure de la brise de mer, un vent synoptique d'une vitesse correspondant au degré 3 à l'échelle de Beaufort (petite brise) est intercepté par la station DAVIS, mais de la composante ouest (peu changeant des  $270^\circ$ )<sup>24</sup>.

Les roses des vents générées à partir des données de la station DAVIS couvrant la période du 07 août au 21 septembre 2020 traduisent la séquence temporelle habituelle des directions et vitesses des brises de mer et de terre. Le matin à 9h, étant donné que le contraste thermique entre terre et mer n'étant pas très prononcé, le site de la station est sous l'influence de plusieurs types de brises : brise d'amont des secteurs nord et nord-ouest (celle du nord-ouest est plus importante de point de vue fréquence et vitesse parce que plus canalisée par la topographie), brise de terre du secteur ouest avec une fréquence moins importante, mais une vitesse pouvant dépasser les 5m/s, une autre brise de terre du secteur sud et une brise de mer qui se fait sentir

<sup>24</sup> Etant donné que le lac de Bizerte est au Sud-Ouest ( $225^\circ$ ) par rapport à la station DAVIS du CRDA de Bizerte, cette brise peu changeante des  $270^\circ$  ne peut pas être une brise de lac.

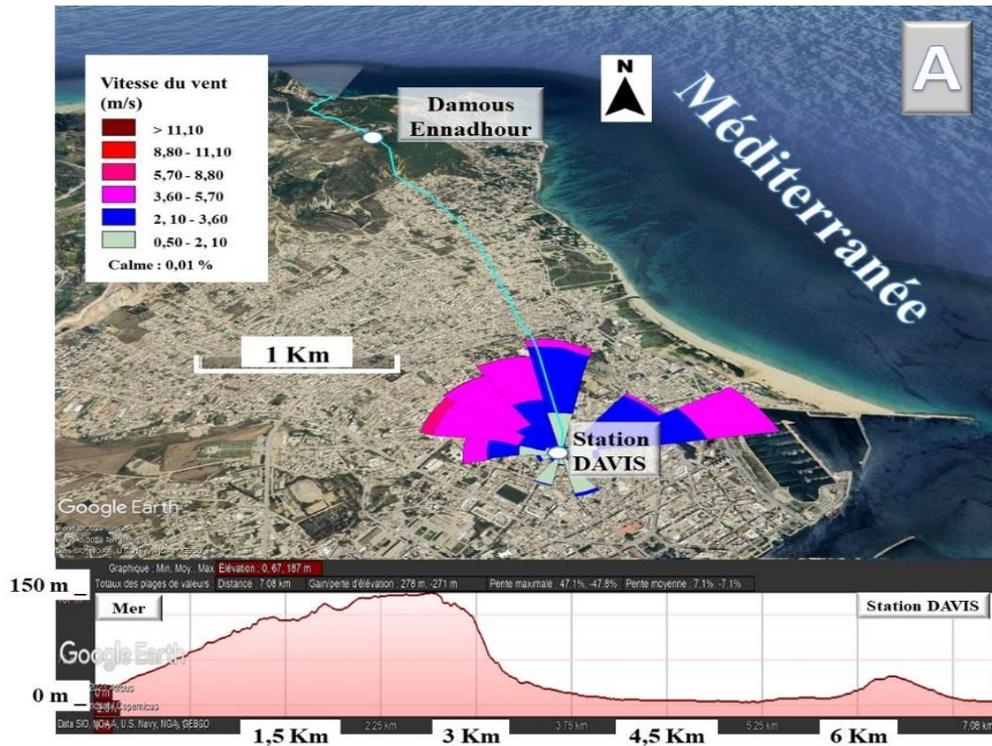
avec une vitesse avoisinant les 3,5m/s. À 15h, le contraste thermique terre-mer bien installé, la brise de mer prend de l'ampleur au niveau des directions nord et est mais aussi de point de vue vitesse qui oscille entre 2m/s et 5,7 m/s. Sur la rose des vents de 21h, on remarque que la brise de mer laisse la place pour les brises d'amont (du nord) et de terre de l'ouest dont on trouve la continuité sur celle de 3h où la brise de terre est la plus importante (Fig. 4.9).



**Figure 4. 9. Roses des vents par classes de vitesse enregistrés à 9h, 15h, 21h et 3h dans la station DAVIS installée au centre-ville, du 07 août au 21 septembre 2020**

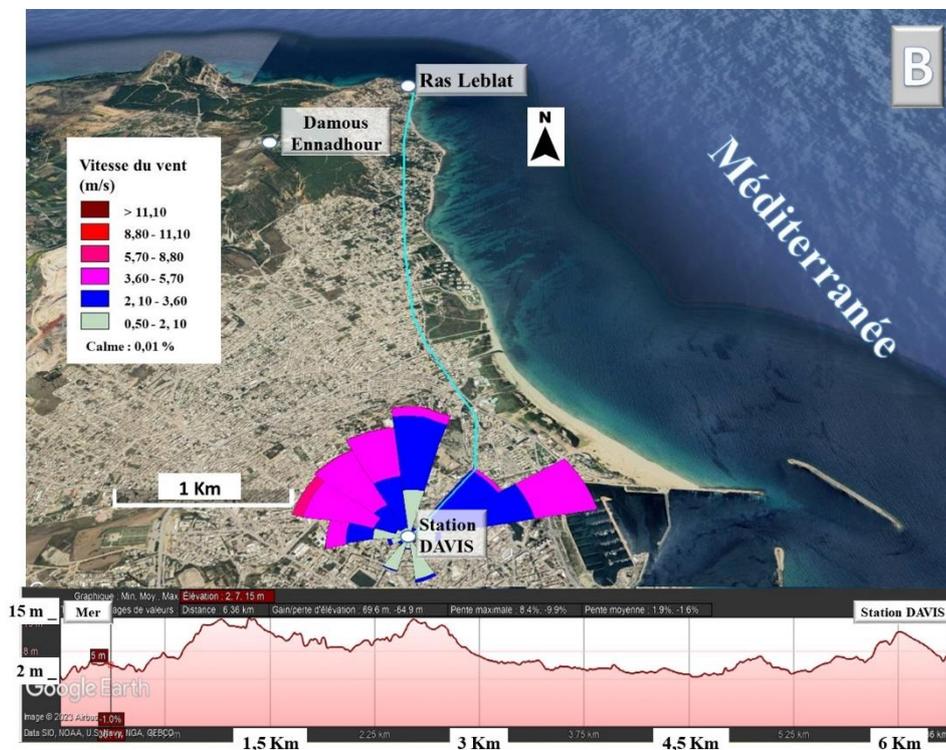
(Données de la station fixe DAVIS installée au CRDA de Bizerte)

La brise de mer du secteur est soufflé ou bien en perpendiculaire au trait de côte (90°) ou bien en oblique du nord-est. En se basant sur les roses des vents du jour (entre la levée et le coucher du soleil), le trajet de la brise de mer venant du secteur nord est influencé par la topographie. Partant de cette constatation, nous avons essayé de tracer les trajets empruntés (deux scénarii) par la brise de mer venant du nord. L'influence de la topographie sur la brise de mer du nord se fait de deux manières : (1) par effet de canalisation : couloir topographique d'une longueur de 3,5 km de la mer jusqu'au niveau de Damous Ennadhour pour le scénario 1 (Fig. 4.10). Cet effet de canalisation apparait aussi pour la brise coulant sur le versant est de Jbel Ennadhour et renforcée par une brise de mer de l'est pour le scenario 2 (Fig. 4.11).



**Figure 4. 10. Schématisation du scenario 1 de la brise de mer venant du Nord pour la station DAVIS installée au CRDA de Bizerte**

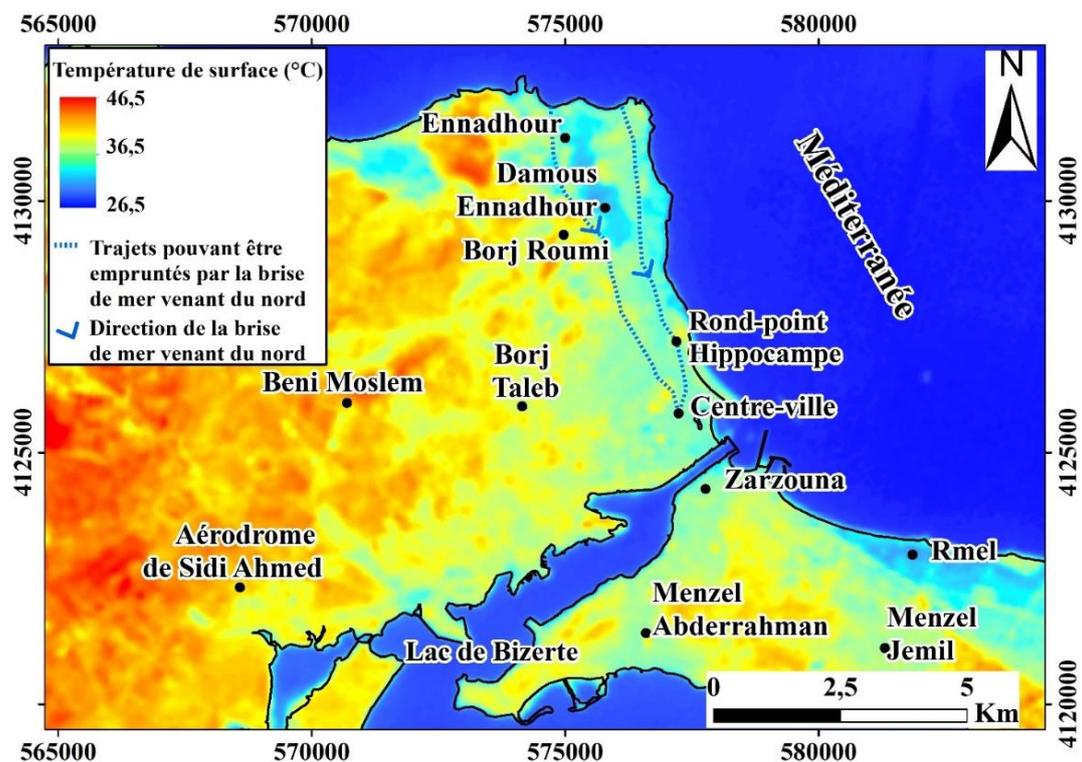
(Données de la station fixe DAVIS installée au CRDA de Bizerte du 07/08/2020 au 21/09/2020 et Google Earth)



**Figure 4. 11. Schématisation du scenario 2 de la brise de mer venant du Nord pour la station DAVIS installée au CRDA de Bizerte**

(Données de la station fixe DAVIS installée au CRDA de Bizerte du 07/08/2020 au 21/09/2020 et Google Earth)

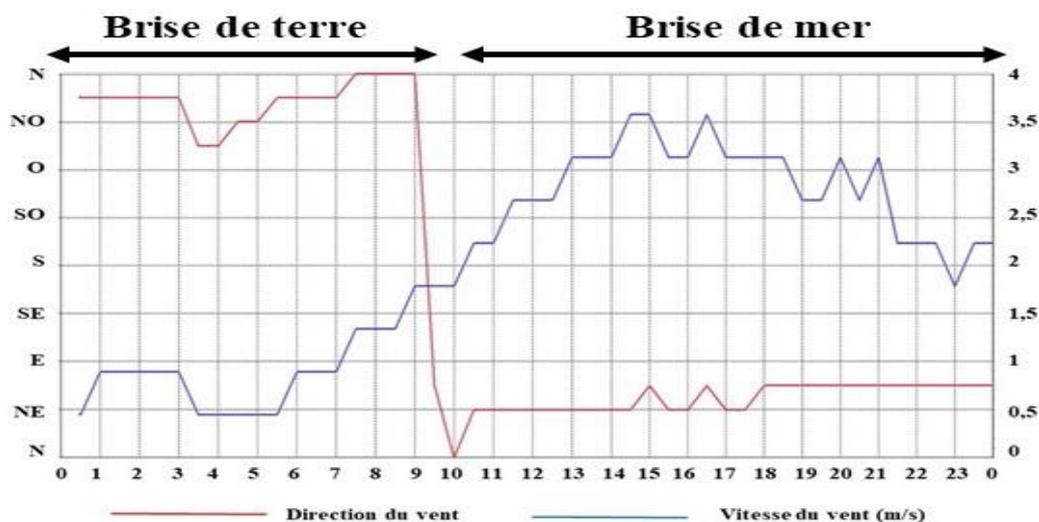
Ces deux scenarii sont aussi perceptibles sur la carte des températures de surface du 13 août 2022 à 10h54 (heure locale, Fig. 4.12).



**Figure 4. 12. Carte des températures de surface au 13/08/2022 à 10h54 (heure locale)**  
(Image Landsat 8 OLI-TIRS)

L'influence du vent synoptique apparaît aussi au niveau des brises de terre et d'amont. En effet, d'une vitesse modérée<sup>25</sup> (3-10 m/s), un vent synoptique peut favoriser la brise en empruntant la même direction. A titre d'exemple le 04 septembre 2020, le vent synoptique a favorisé (1) une brise d'amont oscillante entre le nord et le nord-ouest jusqu'à 09h et (2) une brise de mer qui s'est installée jusqu'à minuit. On trouve cette influence du vent synoptique sous forme de concordance entre l'anémogramme (Fig. 4.13) et sur les cartes des vents à 10 m du même jour à 06h UTC (07 h heure locale) et à 12 h UTC (13h heure locale).

<sup>25</sup> Météo France, [http://files.meteofrance.com/files/glossaire/FR/glossaire/designation/658\\_curieux\\_view.html](http://files.meteofrance.com/files/glossaire/FR/glossaire/designation/658_curieux_view.html)

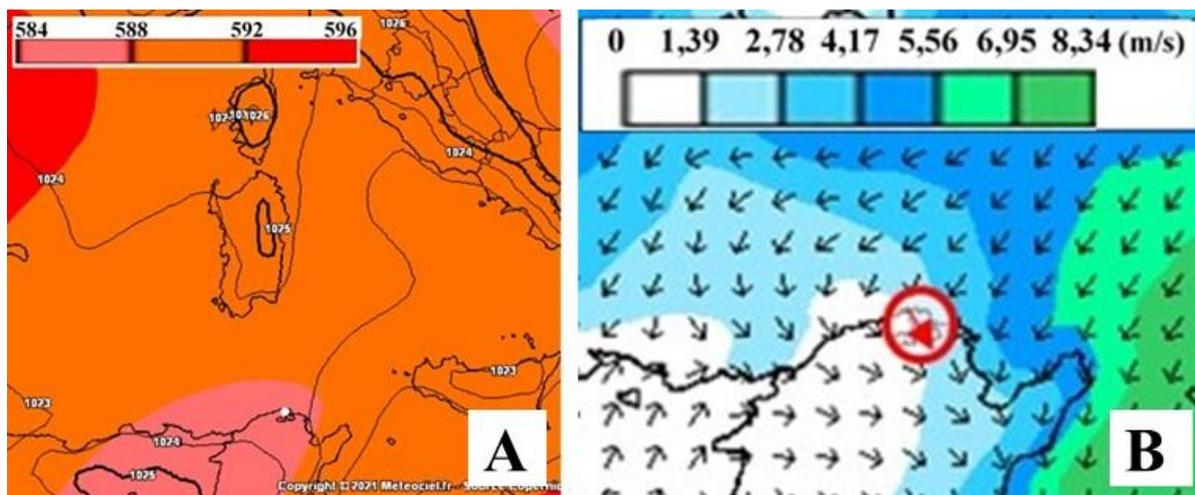


**Figure 4. 13. Anémogramme montrant l’alternance entre brise de terre et brise de mer à Bizerte à partir de l’exemple du 04 septembre 2020**

(Données de la station fixe DAVIS installée au CRDA de Bizerte)

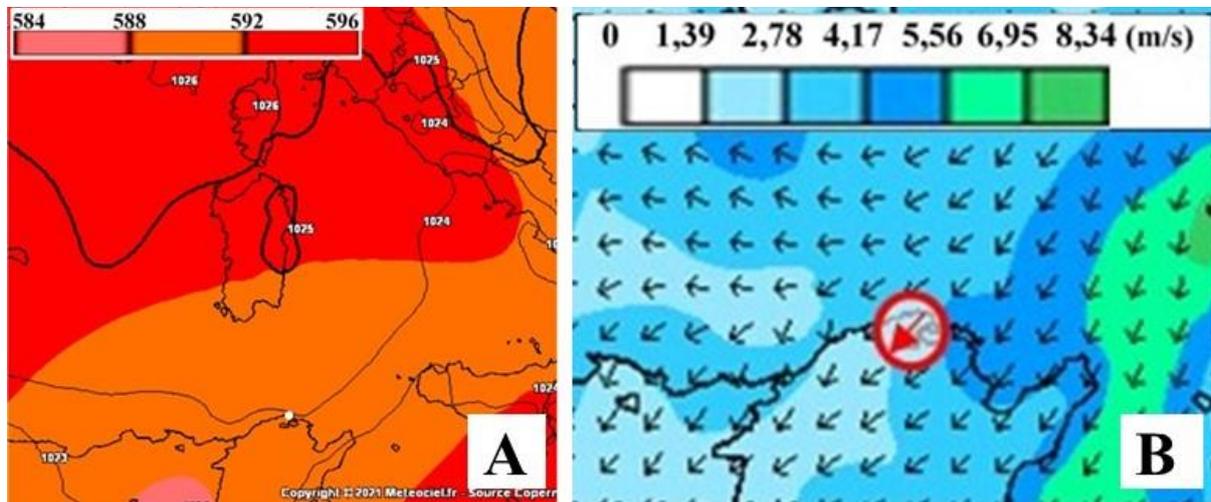
La brise d’amont (nord-ouest) venant des hauteurs d’Enndhaour et canalisée par la topographie, est reportée en tant que vent du nord-ouest et la brise de mer est reportée à son tour comme un vent de l’est sur les cartes des vents.

En altitude, au niveau du géopotential 500 hPa, à 06h UTC (07 h heure locale, Fig. 4.14), la situation est caractérisée par une dorsale barométrique d’une orientation sud-ouest – nord-est. En surface, un noyau de haute pression (1025 hPa) centré sur l’est de l’Algérie est responsable du vent soufflant sur le nord de la Tunisie du nord-ouest.



**Figure 4. 14. Carte du géopotential 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 04 septembre 2020 à 07 h (heure locale). Vitesses converties de km/h en m/s (le pas original est de 5 km/h). Le point blanc désigne Bizerte (ERA5, Copernicus ECMWF (meteociel.fr))**

A 13 h (Fig. 4.15), une dorsale couvrant l'ouest de la Méditerranée, la Sardaigne et la Corse jusqu'à le centre-ouest de l'Italie (en altitude) et une dorsale (1024 hPa) orientée nord-sud sur les côtes nord de Bizerte (en surface) sont responsables du vent du nord-est enregistré à la station supplémentaire DAVIS du centre-ville.

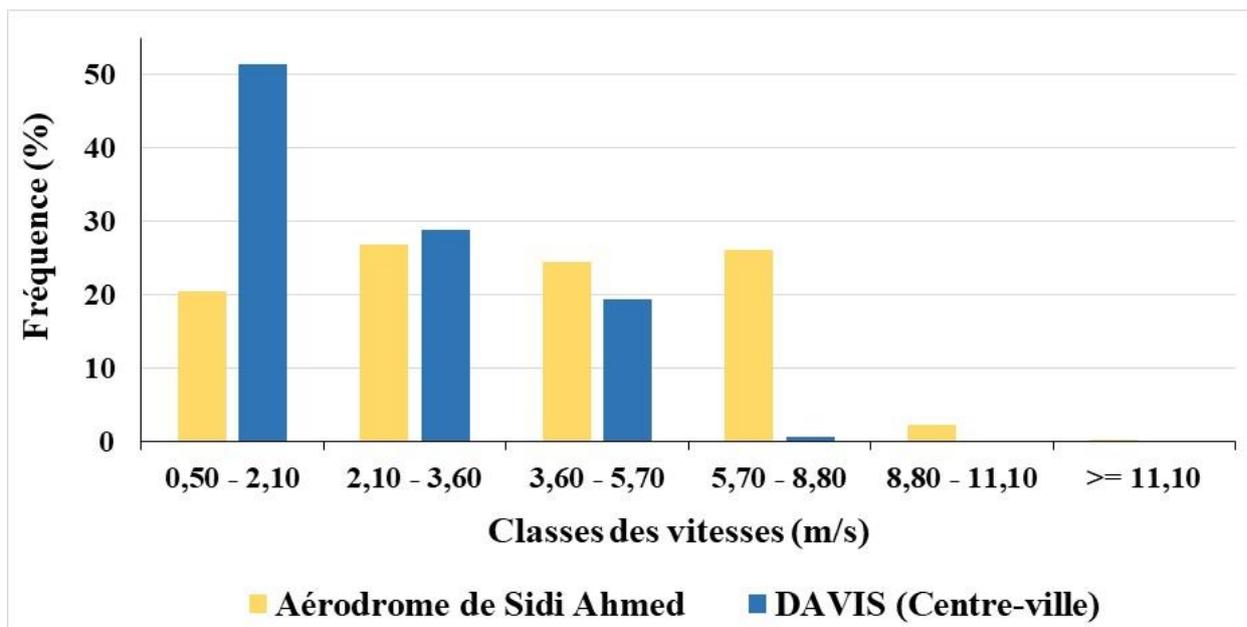


**Figure 4. 15. Carte du géopotentiel 500 hPa (dam) et de la pression au niveau de la mer (hPa) (A) et des vents à 10 m (B) du 04 septembre 2020 à 13 h (heure locale). Vitesses converties de km/h en m/s (le pas original est de 5 km/h). Le point blanc désigne Bizerte (ERA5, Copernicus ECMWF (meteociel.fr))**

### 2.3. Analyse comparative des situations de brise entre la station météorologique de l'aérodrome de Sidi Ahmed et celle du centre-ville :

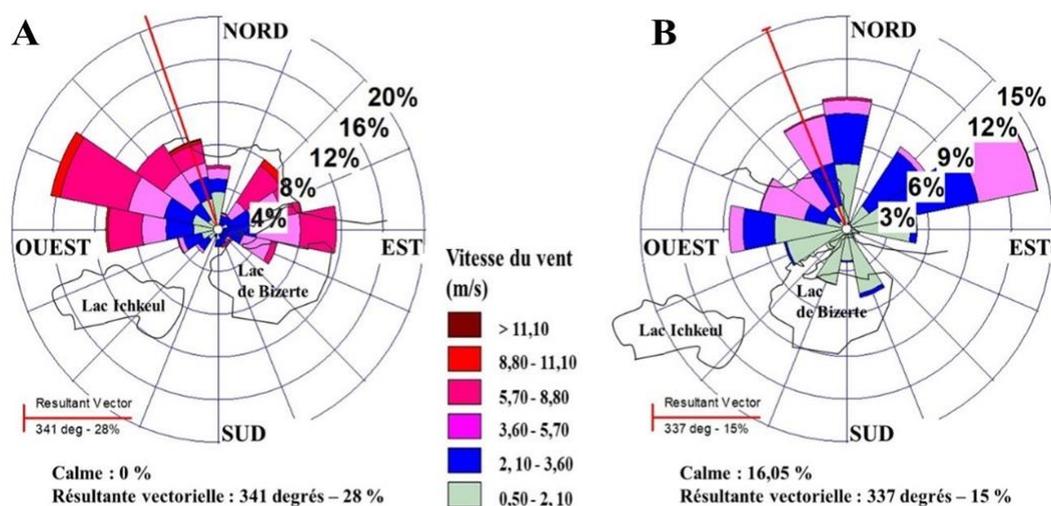
Dans cette partie d'analyse, on s'est basé sur les données des deux stations : celle de l'aérodrome de Sidi Ahmed et celle installée au centre-ville de Bizerte. Afin de pouvoir comparer les situations de brise entre les deux stations, on a choisi la période commune (pendant laquelle on a enregistré des jours de brise) allant du 07 août au 21 septembre 2020.

L'analyse globale montre que la fréquence des brises à faible vitesse est plus importante au niveau du centre-ville qu'à l'aérodrome de Sidi Ahmed. Il s'agit à la base de l'effet de rugosité dans le domaine urbain qui contribue à la diminution de la vitesse du vent. Jusqu'à 3,6 m/s, la fréquence des vents de cette catégorie, au centre-ville, avoisine les 80%. Etant donné que l'arrière-pays de Bizerte, là où se trouve la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed, est un espace dégagé, la fréquence des vents à vitesse plus élevée est plus importante. En effet, à partir de 5,70 m/s, on n'enregistre pas de brise (avec cette vitesse) au centre-ville, contre 30% entre 5,70 et 8,80 m/s à Sidi Ahmed (Fig. 4.16).



**Figure 4. 16. Comparaison des vitesses de vents enregistrés par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed et au centre-ville**  
(INM-METAR et station DAVIS du 07/08/2020 au 21/09/2020)

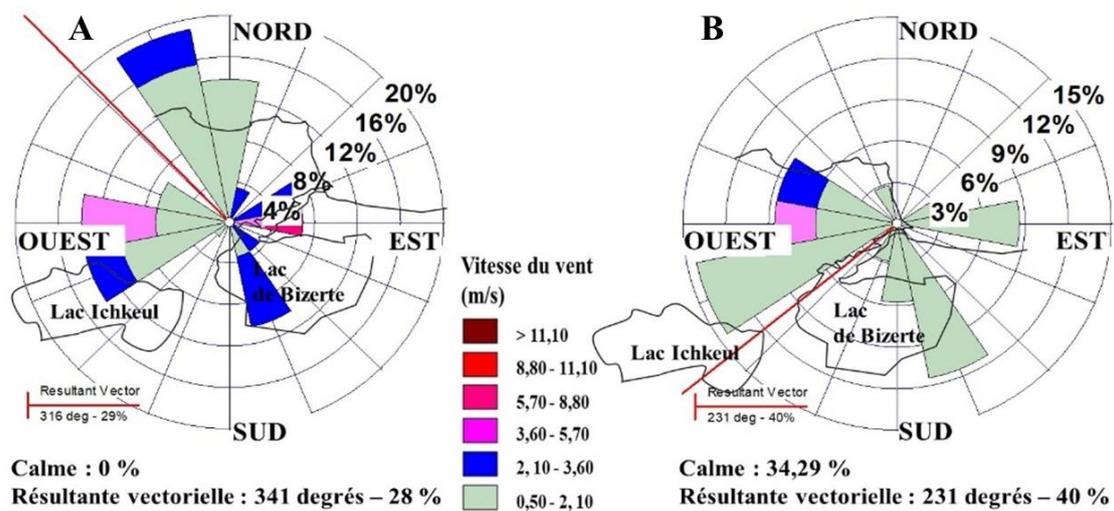
A l'aérodrome de Sidi Ahmed, on enregistre plus de brises de la composante ouest, alors qu'au centre-ville ce sont les composantes est et nord qui sont privilégiées car le site est plus sous l'influence de la mer (Fig. 4.17).



**Figure 4. 17. Roses des vents enregistrés par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B)**  
(INM-METAR et station DAVIS du 07/08/2020 au 21/09/2020)

Par heure, les brises à faibles vitesses (à modérées) restent plus fréquentes au centre-ville. Celles de la composante ouest sont plus fréquentes pendant les heures de nuit, alors que pendant les heures de jour, ce sont les composantes nord et est qui sont les plus importantes.

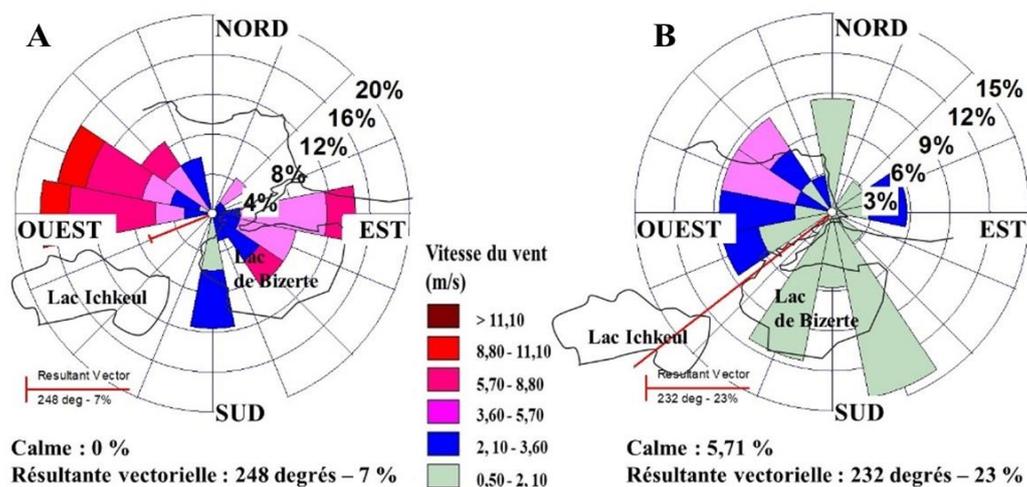
En détail, à 03h du matin (Fig. 4.18), c'est la brise de terre qui est plus active par rapport aux deux stations. À cause de la distance qui sépare les deux stations de la mer, la brise de terre a plus de fréquence de la composante nord à ouest sud-ouest pour la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed. Au niveau du centre-ville, elle est plus fréquente de la composante ouest à sud sud-est. Pour la brise enregistrée de la composante est, il s'agit fort probablement d'une brise de mer « tardive » qui s'est étalée jusqu'à cette heure-ci.



**Figure 4. 18. Roses des vents enregistrés à 03 h par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B)**

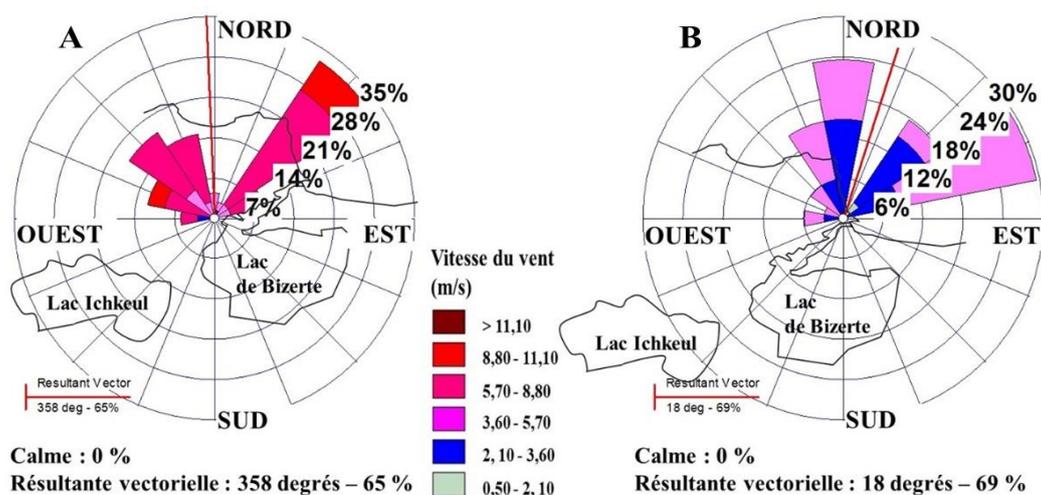
(INM-METAR et station DAVIS du 07/08/2020 au 21/09/2020)

À 09h du matin (Fig. 4.19), la composante ouest commence à s'estomper au profit des composantes sud, est et nord. À cause de la distance qui sépare les deux stations par rapport au lac de Bizerte (le lac de Bizerte est plus proche de l'aérodrome de Sidi Ahmed que du centre-ville), la brise de sa provenance est enregistrée du sud-est avec une vitesse plus importante au niveau de l'aérodrome de Sidi Ahmed (jusqu'à 11,10 m/s). La brise enregistrée de la composante sud de la station du centre-ville peut être soit (1) une brise de lac dont la vitesse est affaiblie à cause de son passage par l'espace urbain de Menzel Abderrahman, et Zarzouna, (2) soit une brise de terre générée par le gradient thermique entre terre (Menzel Abderrahman, et Zarzouna) et la mer au nord.



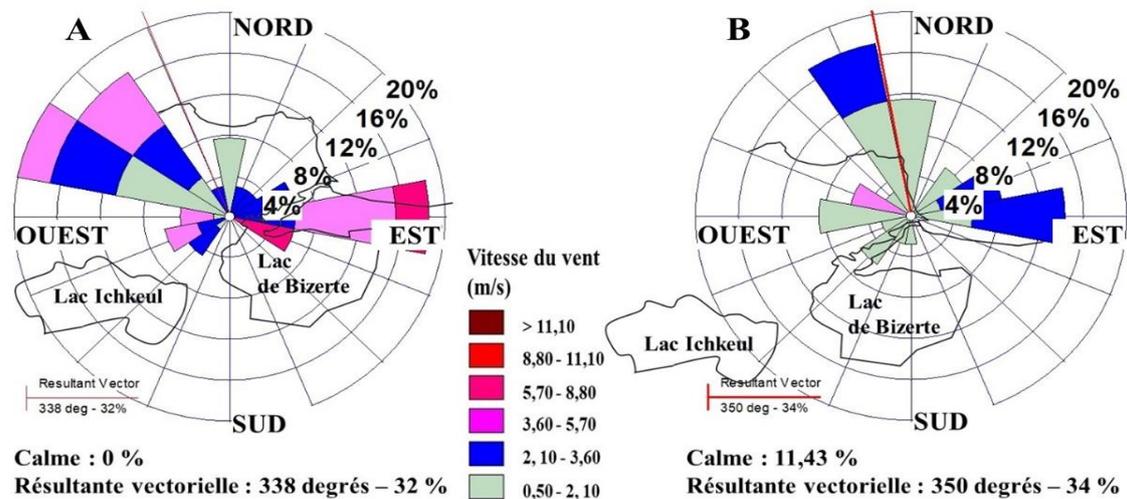
**Figure 4. 19. Roses des vents enregistrés à 09 h par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B) (INM-METAR et station DAVIS du 07/08/2020 au 21/09/2020)**

À 15 h (Fig. 4.20), le gradient thermique entre terre et mer est plus prononcé, la brise de mer est plus active. Elle est de provenance nord-est par rapport à la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed. Pour la station du centre-ville, cette brise a deux directions principales : nord et nord-est. Les vitesses de cette brise de mer restent plus importantes à Sidi Ahmed qu'au centre-ville (même si on enregistre, au centre-ville, une augmentation de la vitesse des brises qui atteignent 5,70 m/s plus fréquemment). Ce fait s'explique d'une part par la hauteur à laquelle est implanté l'anémomètre (12m à Sidi Ahmed contre 9m au CRDA) et d'autre part par la rugosité des terrains aux alentours des deux stations. En effet, en ville le vent est ralenti par les bâtiments alors que le milieu est dégagé dans la base militaire de Sidi Ahmed et ses alentours.



**Figure 4. 20. Roses des vents enregistrés à 15 h par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B) (INM-METAR et station DAVIS du 07/08/2020 au 21/09/2020)**

A 21 h (Fig. 4.21), la brise de mer « tardive » est encore enregistrée dans les deux stations avec une reprise de la place de la brise de terre de la composante ouest.



**Figure 4. 21. Roses des vents enregistrés à 21 h par jours de brise à l'aérodrome de Sidi Ahmed (A) et au centre-ville (B) (INM-METAR et station DAVIS du 07/08/2020 au 21/09/2020)**

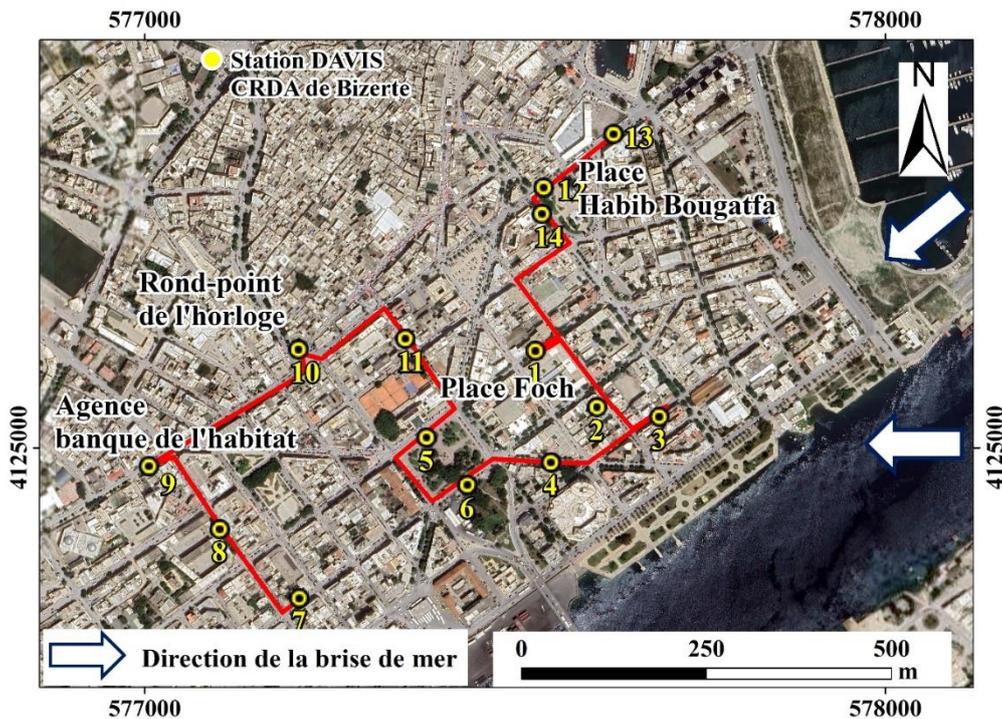
À une mésoéchelle, l'effet de l'architecture urbaine sur l'orientation et la vitesse des brises (de terre ou de mer) n'est pas très perceptible. Or, d'après la bibliographie, Yoshino, 1975 ; Carrega, 1994 et Quéno, 2002, la nature, l'orientation et la vitesse de la brise sont très influencés par la nature radiative des différents éléments de la ville, leurs encaissements et leurs orientations.

### 3. L'étude des brises à l'échelle fine : le quartier européen comme exemple

De nombreuses spécificités urbaines influencent l'écoulement aérologique et ses caractéristiques. Les éléments clés sont : (1) la géométrie urbaine ("canyons urbains", largeur des voies, encaissement par rapport aux bâtiments), qui influencent le flux d'air et sa vitesse et (2) l'utilisation massive de matériaux imperméables et la répartition de la végétation qui modifient les propriétés et les échanges thermiques. Pour aborder l'analyse de l'interaction de quelques paramètres affectant les brises dans le domaine urbain à Bizerte, nous allons nous appuyer sur l'exemple du quartier européen au sud de Bizerte Nord. Pour le choix du circuit à emprunter pour effectuer les mesures mobiles dans le quartier européen, on a pris en considération la représentativité des points de mesures des différents sites par rapport à l'orientation des artères et la direction de la brise de mer (Fig. 4.22).

« L'orientation, la largeur, l'encaissement, la rugosité et la distance par rapport à la mer des voies de circulation peuvent être classées en deux grandes classes : (1) des voies orientées

dans le même sens de l'écoulement de la brise de mer (venant de l'est à est-nord-est) avec un dimensionnement (largeur entre 8 et 12 mètres) permettant l'écoulement fluide de l'air, (2) des voies, oblique voir perpendiculaire à la brise, d'une orientation nord-ouest et dont la largeur et moins importante que la première catégorie (5-10 mètres) (Fig. 4.23). Une autre orientation des rues, moins fréquente, est celle de l'est-ouest. Elle s'individualise par des largeurs importantes variantes entre 10 et 15 m » (Sellami et al., 2022).



**Figure 4. 22. Orientation des voies de circulation par rapport à la brise de mer dans le quartier européen à Bizerte**  
(Google Earth)

L'analyse de la répartition des vitesses du « vent » dans le quartier européen reflète l'interaction conjointe de plusieurs paramètres dont notamment :

- Influence des espaces végétalisés : Dans le quartier européen, au début de l'après-midi, l'effet des espaces verts n'apparaît pas beaucoup comme à la place Foch (Point 6, Fig. 4.23). En fin de l'après-midi, et notamment au coucher du soleil, l'effet rafraîchissant de la végétation rend le gradient thermique mer/terre moins important et, par conséquent, l'appel à l'air diminue.
- Pour le cas de la Place Habib Bougatfa (Point 3, Fig. 4.23), l'étendue de cet espace vert étant moins importante, son effet d'adoucissement est moins ressenti. L'après-midi, quand la température augmente, le contraste thermique du site avec son

environnement (et avec la mer) devient plus important ce qui influence la vitesse de la brise de mer, qui augmente.

- Influence de la largeur des rues : les rues ou avenues les plus larges enregistrent des vitesses moins importantes et ce à cause de la faiblesse de l'effet de canalisation.
- Influence de l'encaissement par rapport aux bâtiments entourant le lieu qui agit en combinaison avec la largeur des voies de communication : quand les rues ne sont pas larges (rues canyons) et les bâtiments sont élevés, l'effet de canalisation est exagéré et les vitesses des flux d'air augmentent (exemple rue Farhat Hached (Point 5, Fig. 4.23)

Les brises avec les vitesses les plus importantes (6-7 m/s) sont relevées au début et à la fin de l'après-midi (Fig. 4.23). Elles sont observées dans les sites se trouvant sous l'influence d'un environnement à effet « canyon ». Dans le cas contraire, les sites à encaissement moins important et des rues plus larges, comme les rond-points, enregistrent des vitesses de brises plus faibles et ce par effet de « relâchement » de l'effet de canalisation comme le site du rond-point de l'horloge (Point 4, Fig. 4.24) à l'avenue Habib Bourguiba (Sellami *et al.*, 2022).



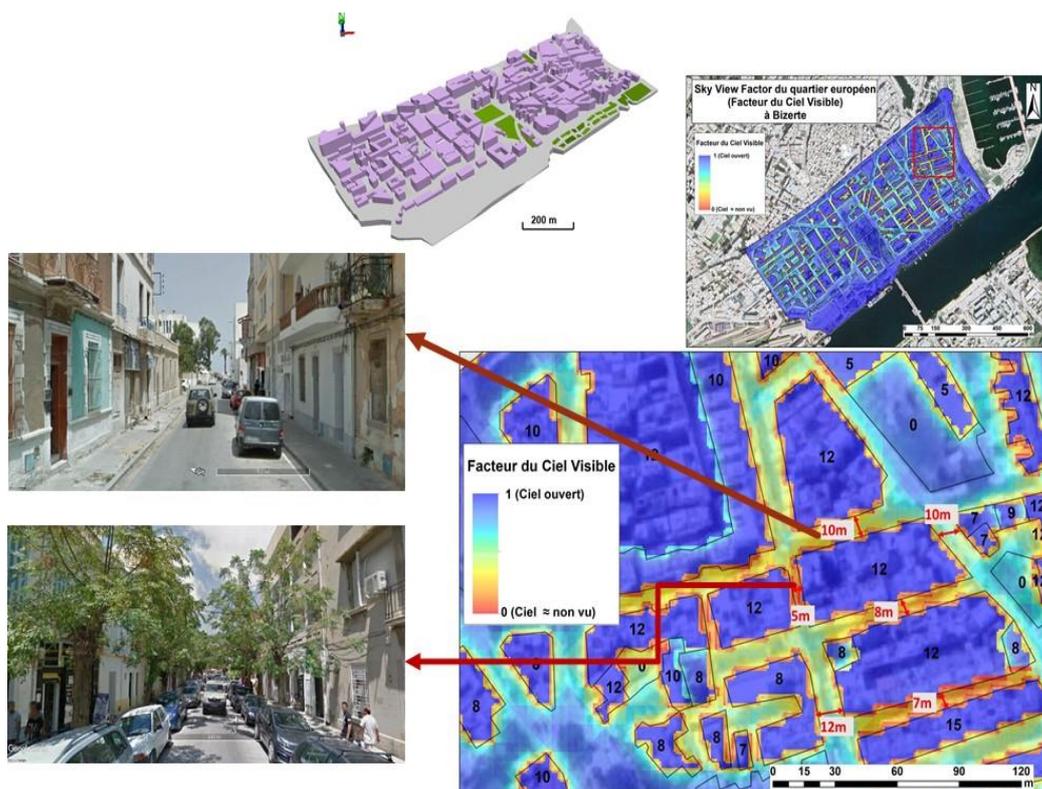


**Figure 4. 23. Vents en début de l'après-midi (A) et en fin d'après-midi (B) dans le quartier européen à Bizerte (les 20 et 21 août 2021), (1) Station DAVIS, (2) Croisement Avenue Habib Bourguiba et rue Garibaldi, (3) Place Habib Bougatfa, (4) Avenue Habib Bourguiba-site de l'horloge, (5) Rue Farhat Hached, (6) Place Foch (Flèche en blanc : le Nord, Flèche en bleu : direction de la brise) (Sellami *et al.*, 2022)**

Ces constatations sont appuyées par le Facteur de vue du ciel (FVC) ou en anglais Sky View Factor<sup>26</sup> (SVF). Cet indice (FVC) est calculé sous QGIS (SagaGIS) en utilisant la maquette 3D du quartier européen avec la valeur de la hauteur des constructions comme information sur le niveau Z (Fig. 4.24).

Dans le quartier européen, les zones enregistrant des vitesses de brises relativement élevées coïncident généralement avec celles dont les SVF sont les plus faibles du quartier (Fig. 4.24 et Fig. 4.25).

<sup>26</sup> Le Facteur de vue du ciel (FVC. En anglais : Sky View Factor, SVF) représente le rapport en un point de l'espace entre le ciel visible et un hémisphère centré sur l'emplacement analysé (Oke, 1981). À un point où le SVF = 0, tout le ciel est masqué par des obstacles. S'il y a un obstacle bloquant des parties de la vue du ciel, le SVF sera supérieur à 0.



**Figure 4. 24. Facteur de vue du ciel dans le quartier européen à Bizerte (FVC.** En anglais: Sky View Factor, SVF) : Illustration par rapport aux largeurs des rues (Campagne de mesure dans le quartier européen à Bizerte, travaux de modélisation 3D, Google Earth et Google Street)



**Figure 4. 25. Facteur de vue du ciel dans le quartier européen à Bizerte (FVC.** En anglais: Sky View Factor, SVF): Illustration par rapport aux vitesses des brises (Campagne de mesure dans le quartier européen à Bizerte, travaux de modélisation 3D, Google Earth et Google Street)

## Conclusion

Nous avons exploité dans ce chapitre les données météorologiques horaires enregistrées entre 1990 et 2022 par la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed à 11 Km de la mer à l'ouest ainsi que des données météorologiques issues de la station automatique DAVIS installée au centre-ville de Bizerte (Commissariat Régional de Développement Agricole de Bizerte, CRDA) durant la période estivale de 2020. Ces données sont complétées et enrichies avec celles des campagnes semi-itinérantes réalisées en août 2021 et 2022. Les connaissances sur les caractéristiques des brises à Bizerte ont pu être améliorées à deux échelles : (1) au niveau de l'agglomération de Bizerte et de son arrière-pays et (2) à un niveau plus fin, au quartier européen au sud-est de Bizerte Nord dans le but de montrer l'effet de la distance par rapport à la mer et l'impact de la diversité des entités topographiques et de l'occupation du sol. D'abord, la brise de mer apparaît sur les sites proches du littoral est. Elle est plus tardive dans l'arrière-pays de l'agglomération. La brise de mer dont la vitesse est entre 2 et 8 m/s est influencée par la topographie et l'occupation du sol. Différents types de brises sont observées dans l'agglomération de Bizerte et son arrière-pays. Il s'agit de la brise de mer (est et nord), de la brise de lac (sud-ouest pour le centre-ville de l'agglomération et sud-est pour son arrière-pays), de la brise de terre (nord-ouest et ouest) et de la brise d'amont (nord et nord nord-ouest).

La fréquence des brises à faible vitesse est plus importante au niveau du centre-ville qu'à l'aérodrome de Sidi Ahmed. Il s'agit à la base de l'effet de rugosité dans le domaine urbain qui contribue à la diminution de la vitesse du vent. Jusqu'à 3,6 m/s, la fréquence des vents de cette catégorie, au centre-ville, avoisine les 80%. Etant donné que l'arrière-pays de Bizerte, là où se trouve la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed, est un espace dégagé, la fréquence des vents à vitesse plus élevée est plus importante à cela s'ajoute la position de l'anémomètre à une hauteur plus élevée (12m contre 9 au centre-ville).

Les brises à faibles vitesses (à modérées) restent plus fréquentes au centre-ville. Celles de la composante ouest sont plus fréquentes pendant les heures de nuit (brise de terre), alors que pendant les heures de jour, ce sont les composantes nord et est qui sont les plus importantes (brise de mer).

À l'échelle du quartier européen, les données relevées pendant la période du jour où c'est la brise de mer qui est active, ont pu montrer l'influence de l'architecture urbaine sur la circulation de l'air. Les brises ont des vitesses plus importantes dans les rues les moins larges, à fort encaissement et qui ont des orientations perpendiculaires au trait de côte.

Afin de déceler en détail les fronts et les horaires de migration des brises (qui influence les taux de pollution atmosphériques), il est nécessaire de multiplier l'installation des stations météorologiques dans l'agglomération de Bizerte (étendue variable entre nord-sud et est-ouest), mais aussi dans les hauteurs du nord, la zone agricole de l'ouest et à Bizerte Sud.

## **CHAPITRE 5**

# **SIROCCO ET TYPES DE TEMPS ASSOCIES DANS L'AGGLOMERATION DE BIZERTE**

En plus de son influence sur la sensation du confort thermique et la santé humaine, notamment en été, le sirocco peut avoir des impacts socio-économiques importants à cause de la forte chaleur et de la sécheresse qu'il apporte. D'un autre côté, le sirocco est favorable aux fortes concentrations des polluants atmosphériques en milieu urbain (surtout lorsqu'il est accompagné avec du vent de sable), notamment s'il est fortement industrialisé comme l'agglomération de Bizerte. Les fortes chaleurs qui l'accompagnent peuvent être à l'origine d'incendies de forêt (Belhadj Khedher *et al.*, 2020) qui sont, entre autres, sources de polluants, notamment les particules fines.

Dans ce qui suit, on va s'intéresser à l'analyse statistique et caractéristiques du sirocco à Bizerte pendant la saison chaude (juin à août avec septembre) de la période 1990-2022.

Nous traitons aussi, à travers des exemples, quelques aspects relatifs aux vents de sable. En fait, une étude détaillée de ce phénomène nécessitera le recours aux Bulletins quotidiens de renseignements (BQR) pour en extraire les statistiques sur les fréquences et la typologie (vent de sable, chasse sable, brumes sèches). Des données que nous n'avons pas pu acquérir. Pour cette raison, on va se limiter à la caractérisation des tempêtes de sable (échelle plus régionale) touchant la zone d'étude. Une information rendue possible grâce aux images satellites.

## **1- Résultats statistiques sur le sirocco à Bizerte**

Les résultats des statistiques descriptives pour toutes les saisons chaudes 1990-2022 indiquent que les variables météorologiques utilisées présentent des distributions étalées et plus pointues qu'une loi normale (Aplatissement leptokurtique). En compensation elles sont moins denses sur les extrémités.

En traitant les données mois par mois, celui de juin s'attache le plus (mais pas en totalité) à une loi normale (Loi de Laplace-Gauss). Les valeurs extrêmes sont plus fréquentes aux mois de juillet et août. L'advection du sirocco est accompagnée par une hausse des températures et par des écarts importants aux normales thermiques.

### **1.1- Sélection des jours de sirocco**

Les critères de sélection des jours de sirocco sont décrits par Dahech (2007). Ces filtres permettent une détection automatique et rapide des jours de sirocco. Une journée est considérée avec sirocco dans le cas où un vent venant du Sahara (du sud sud-est à ouest sud-ouest) avec une vitesse quotidienne moyenne ne dépassant pas 6 m/s, achemine une masse d'air chaude et sèche avec un écart positif d'au moins 4°C entre la température maximale moyenne et la normale du mois et une humidité relative minimale inférieure à 30% doivent être enregistrés.

La consultation de l'archive des réanalyses du ECMWF (ERA5 d'une résolution de 0,25° ou à défaut, CEP/ECMWF d'une résolution de 0,4°) et des cartes de la pression en surface, permet de distinguer les situations barométriques favorables à l'advection du sirocco.

## 1.2- Identification des jours de sirocco par mois

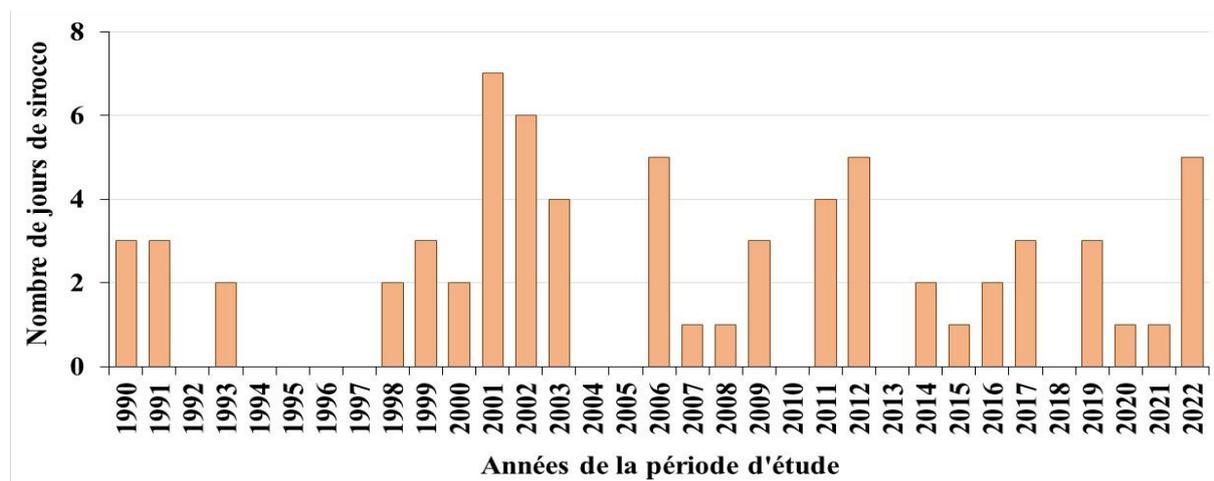
«Les régions les plus affectées par le sirocco sont les régions basses et ouvertes vers le Sud ... Dans la Tunisie du Nord, Tunis et Bizerte situées toutes les deux dans des régions basses et non abritées, connaissent une fréquence assez marquée (respectivement 21,7 et 27,8 jours de sirocco par an ») (Henia L., 1980).

Traboulsi et Ben Boubaker (2012) confirment ce constat : « Les marges littorales orientales de la Tunisie, en l'absence d'obstacles orographiques majeurs à l'hinterland, se trouvent directement exposées à ces advections de sirocco, parvenant du sud ».

Dans ce qui suit on va analyser les aspects fréquentiels et caractéristiques des jours de sirocco à Bizerte.

### 1.2.1- Les jours de sirocco pendant le mois de juin :

D'un nombre total de jours de sirocco égal à 69 (ce qui représente 7% du total des jours du mois pour la période 1990-2022), on compte 10 séquences de jours successifs de sirocco (totalisant 24 jours) dont la plus étalée est celle parvenue vers la fin du mois de juin 2006 avec 5 jours de suite et ce du 18-22 juin 2006 (Fig. 5.1, Tab. 5.1).



**Figure 5. 1. Nombre des jours de sirocco et leurs pourcentages (par rapport au nombre total des jours) pour le mois de juin pour la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

**Tableau 5. 1. Séquences de jours successifs de sirocco pour le mois de juin de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année	Séquence de jours successifs de sirocco					Nombre de jours
1999	01-02 du mois					2
	39,88°C		40,11°C			
2001	09-10 du mois					2
	39,11°C		40,22°C			
2001	15-16 du mois					2
	34°C		37,88°C			
2002	26-28 du mois					3
	35,72°C	34°C		42,61°C		
2003	25-26 du mois					2
	36,27°C		39°C			
2006	18-22 du mois					5
	37°C	38,27°C	39,27°C	40°C	42,88°C	
2011	22-23 du mois					2
	37°C		34,38°C			
2012	02-03 du mois					2
	34,38°C		36,11°C			
2014	23-24 du mois					2
	39,27°C		37,88°C			
2022	21-22 du mois					2
	39,22°C		35,77°C			

Ces résultats sont en concordance partielle avec ceux avancés par Henia en 1980. Toutefois, le nombre de jours de sirocco est variable d'une année à l'autre (Tab. 5.2). Etant donné que la méthode utilisée pour identifier les jours de sirocco n'est pas la même, certains résultats peuvent présenter des différences importantes. Dans son article, Henia en 1980, a

utilisé la méthode des valeurs maximales de la différence psychrométrique<sup>27</sup>. Elle la qualifie comme l'unique source de toute étude fréquentielle du sirocco et qu'il faut interpréter ces données avec précaution parce qu'elle n'est pas sans inconvénient.

**Tableau 5. 2. Fréquence des jours de sirocco de la période 1970-1977 pour quelques villes du nord de la Tunisie**

(Henia, 1980)

Stations	Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
Ain Draham	0	0	0	0	0,2	0,2	1,3	4,4	1,5	0,7	0	0	8,8
Tabarka	0	0,1	0,5	0,1	0,9	0,8	1,2	2,1	2,2	0,7	0	0	8,6
<b>Bizerte</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,7</b>	<b>5,4</b>	<b>7,3</b>	<b>8,5</b>	<b>4,1</b>	<b>1,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0</b>	<b>27,8</b>
Tunis	0	0,1	0	0,1	1,3	4,5	7,4	5,5	2,4	0,4	0	0	21,7
Kclibia	0	0	0	0	0,1	0,3	0,7	0,7	0,4	0	0	0	2,2
Hammamet	0	0	0	0,1	0,1	0,3	1,0	0,8	0,3	0	0	0	1,7
Jendouba	0	0	0,4	0,7	4,8	4,1	3,4	5,2	3,4	0,4	0	0	22,2
Kef	0	0	0	0	1,0	3,6	2,8	2,1	0,5	0,4	0	0	10,4

Synchronisé avec les résultats des analyses des dépassements des seuils et de la classification des types de temps, évoqués dans le chapitre sur les types de temps estivaux, c'est le type de temps le plus chaud qui compte le nombre le plus important des jours de sirocco (Tab. 5.3). Rappelons-le que la classe 3, la plus chaude du mois de juin, se caractérise par une moyenne d'écart de la température maximale à la normale du mois de l'ordre de 7,2°C. Cette classe représente 15 % des jours du mois de juin. Elle enregistre, seule, 19 cas où la température maximale est  $\geq 40^\circ\text{C}$ .

**Tableau 5. 3. Nombre de jours de sirocco par classe pour le mois de juin de la période 1990-2022**

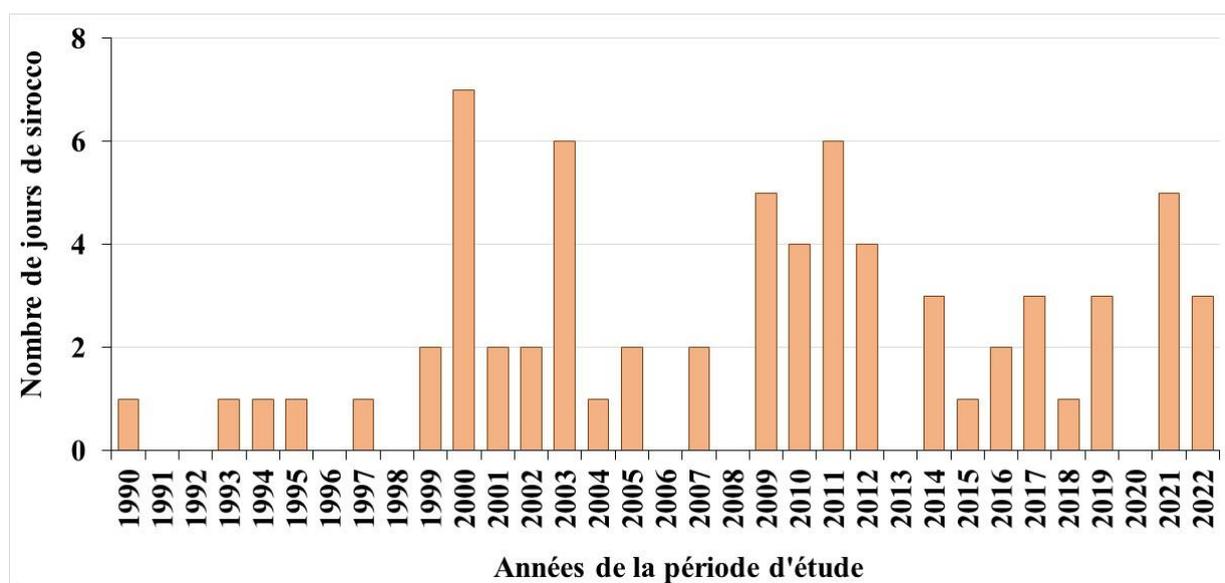
(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classe des mois de juin	Nombre de jours de sirocco
Classe 1	0
Classe 2	12
Classe 3	57
<b>Total général</b>	<b>69</b>

<sup>27</sup> Différence psychrométrique =  $T - t'$ , où du thermomètre (T) est la température du thermomètre sec sous abri et ( $t'$ ) est la température mouillée sous abri.

### 1.2.2- Les jours de sirocco pendant le mois de juillet :

La variabilité interannuelle des jours de sirocco pour le mois de juillet est plus élevée que celle du mois de juin (coefficient de variation égal à 371,82). On compte pendant le mois de juillet 69 jours de sirocco, dont 16 séquences de jours successifs (totalisant 40 jours). Les deux séquences les plus étendues sont celles du 01 au 04 juillet 2000 et du 10 au 13 juillet 2011 (04 jours) (Fig. 5.2, Tab. 5.4).



**Figure 5. 2. Nombre des jours de sirocco et leurs pourcentages (par rapport au nombre total des jours) pour le mois de juillet pour la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

**Tableau 5. 4. Séquences de jours successifs de sirocco pour le mois de juillet de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année	Séquence de jours successifs de sirocco	Nombre de
2000	01-04 du mois	4
	38°C   42,11°C   42°C   39°C	
2000	06-07 du mois	2
	37°C   44,38°C	
2002	22-23 du mois	2
	38,77°C   38,72°C	
2003	14-16 du mois	3
	39,11°C   39,72°C   43,77°C	
2003	22-23 du mois	2
	39,38°C   42,22°C	
2005	16-17 du mois	2
	37,38°C   41,22°C	

Année	Séquence de jours successifs de sirocco	Nombre de
2007	23-24 du mois	2
	44,22°C   44°C	
2009	14-16 du mois	3
	39,61°C   38,27°C   37,77°C	
2009	23-24 du mois	2
	40,27°C   41,72°C	
2010	22-23 du mois	2
	37,11°C   40,5°C	
2011	10-13 du mois	4
	38,38°C   41°C   38°C   41,22°C	
2012	10-11 du mois	2
	39,11°C   38,38°C	
2017	11-12 du mois	2
	42°C   39,88°C	
2019	06-08 du mois	3
	37,77°C   40°C   39,11°C	
2021	26-28 du mois	3
	43,11°C   39,22°C   42°C	
2021	30-31 du mois	2
	39°C   44,61°C	

Synchronisé avec les résultats des analyses des dépassements des seuils, évoqués dans la partie sur la classification des types de temps, c'est la classe 1 (la plus chaude avec une moyenne d'écart de la température maximale à la normale du mois de l'ordre de 7,5°C. Cette classe représente 8,7 % des jours du mois de juillet. Elle enregistre, seule, 44 cas où la température maximale est  $\geq 40^\circ\text{C}$  et 01 cas où elle est  $\geq 45^\circ\text{C}$ . Aussi, cette classe compte le nombre le plus important des jours de sirocco du mois de juillet (Tab. 5.5). Elle occupe plus la deuxième moitié du mois et compte 83 jours où la température maximale dépasse de 5°C la normale du mois (les écarts les plus importants sont enregistrés pendant deux jours de sirocco : (1) 13,07°C le 07/07/1998 avec un vent du sud-ouest à 12h, une pression atmosphérique de 1011,31 hPa et une température de 45,61°C, (2) 12,07°C le 31/07/2021 avec un vent du sud sud-ouest à 17h, une pression atmosphérique de 1010,4 hPa et une température de 44,61°C.

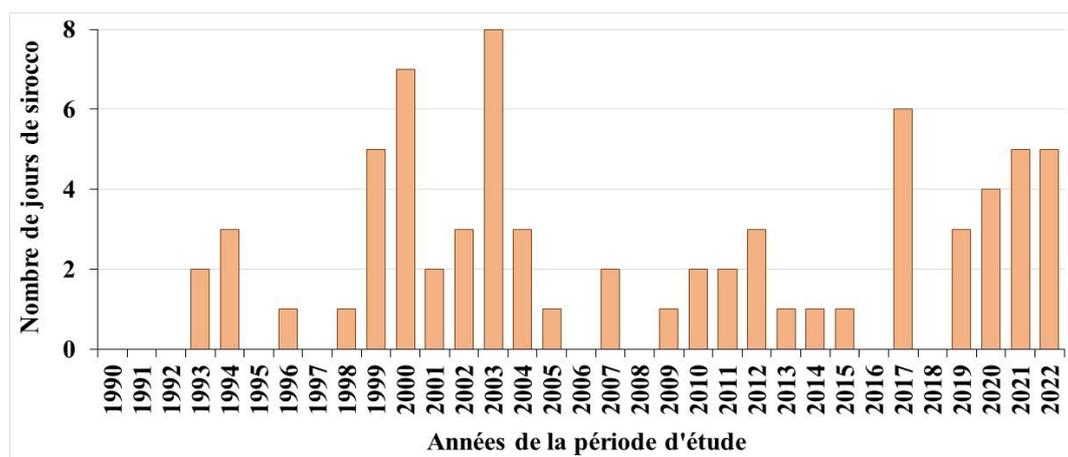
**Tableau 5. 5. Nombre de jours de sirocco par classe pour le mois de juillet de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classe des mois de juillet	Nombre de jours de sirocco
Classe 1	49
Classe 2	20
Classe 3	0
<b>Total général</b>	<b>69</b>

### 1.2.3- Les jours de sirocco pendant le mois d'août :

La variabilité interannuelle des jours de sirocco pour le mois d'août est légèrement moins élevée que celle du mois de juillet (coefficient de variation égal à 363,22). On compte pendant le mois d'août 72 jours de sirocco, dont 14 séquences de jours successifs (totalisant 34 jours). Les deux séquences les plus étendues sont celles du 23 au 25 août 2000 et du 16 au 19 août 2003 (04 jours) avec en deuxième lieu du 09-11 août 2021 et du 15-17 août 2022 (03 jours, Fig. 5.3, Tab. 5.6).



**Figure 5. 3. Nombre des jours de sirocco et leurs pourcentages (par rapport au nombre total des jours) pour le mois d'août pour la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

**Tableau 5. 6. Séquences de jours successifs de sirocco pour le mois d'août de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année	Séquence de jours successifs de sirocco	Nombre de jours
1994	09-10 du mois	2
	39,5°C   43,5°C	
1999	19-20 du mois	2
	44,38°C   43°C	
2000	19-20 du mois	2
	41,61°C   39,38°C	
2000	22-25 du mois	4
	40°C   39,5°C   39,27°C   41°C	
2001	03-04 du mois	2
	38,11°C   38,5°C	
2002	02-03 du mois	2
	42,50°C   44,22°C	

Année	Séquence de jours successifs de sirocco				Nombre de jours
2003	16-19 du mois				4
	40,72°C	42°C	40,11°C	40°C	
2007	29-30 du mois				2
	43,39°C		41,61°C		
2012	24-25 du mois				2
	39,88°C		38,72°C		
2017	06-07 du mois				2
	38,61°C		39,27°C		
2019	06-07 du mois				2
	39°C		42,22°C		
2020	13-14 du mois				2
	42°C		41,22°C		
2021	09-11 du mois				3
	42°C	48,89°C	43°C		
2022	15-17 du mois				3
	42,38°C	39,38°C	43,27°C		

93 % des 72 jours de sirocco sont contenus dans la classe 3 (Tab. 5.7). C'est la classe la plus chaude avec une moyenne d'écart de la température maximale à la normale du mois de l'ordre de 2,9°C. Cette classe représente 36,14 % des jours du mois d'août. Elle enregistre, seule, 59 cas où la température maximale est  $\geq 40^\circ\text{C}$  et 02 cas où elle est  $\geq 45^\circ\text{C}$ . Cette classe occupe plus la première moitié du mois et compte 98 cas de dépassement de 5°C de plus entre la température maximale et la température maximale moyenne du mois (les écarts les plus importants sont enregistrés pendant deux jours de sirocco et 14 cas où l'écart entre  $T_n$  et la température minimale moyenne du mois a atteint ou dépassé les 5°C de plus.

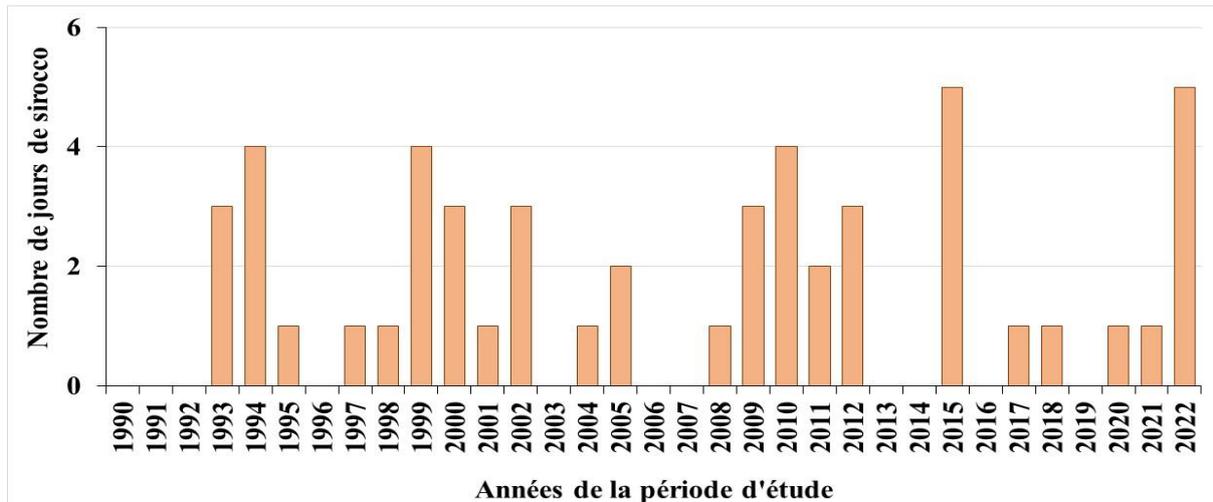
**Tableau 5. 7. Nombre de jours de sirocco par classe pour le mois d'août de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Classe des mois d'août	Nombre de jours de sirocco
Classe 1	0
Classe 2	5
Classe 3	67
<b>Total général</b>	<b>72</b>

#### 1.2.4- Les jours de sirocco pendant le mois de septembre :

La variabilité interannuelle des jours de sirocco pour le mois de septembre est plus élevée que celle du mois d'août (coefficient de variation égal à 427,70). On compte pendant le mois de septembre 51 jours de sirocco (5% de son total de jours pendant la période 1990-2022), dont 10 séquences de jours successifs (totalisant 24 jours). Les séquences les plus étendues sont celles du 16-18 septembre 2000, du 01-03 septembre 2009, du 22-24 septembre 2012 et du 14 au 16 septembre 2015 (03 jours) (Fig. 5.4, Tab. 5.8).



**Figure 5. 4. Nombre des jours de sirocco et leurs pourcentages (par rapport au nombre total des jours) pour le mois de septembre pour la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

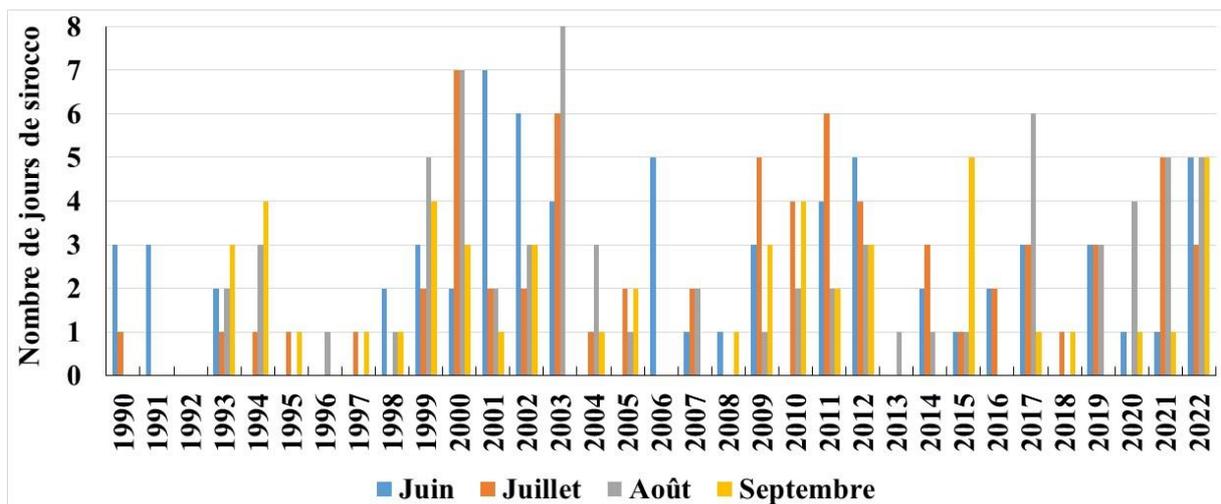
72 % des jours de sirocco du mois de septembre (au nombre de 51), sont contenus dans la classe 1 la plus chaude. La moyenne d'écart de la température maximale à la normale du mois de cette classe est de l'ordre de 5,67°C. Cette classe représente 8 % des jours du mois de septembre. Elle enregistre, seule, 10 cas où la température maximale est  $\geq 40^{\circ}\text{C}$ . Cette classe occupe plus la première moitié du mois et compte 75 cas de dépassement de 5°C de plus entre la température maximale et la température maximale moyenne du mois (aucun cas de dépassement entre la température maximale et la température maximale moyenne du mois  $< -5^{\circ}\text{C}$  pour cette classe). On trouve aussi dans la classe 1, 20 cas où l'écart entre température minimale du jour et la température minimale moyenne du mois est  $\geq 5^{\circ}\text{C}$  de plus.

**Tableau 5. 8. Séquences de jours successifs de sirocco pour le mois de septembre de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Année	Séquence de jours successifs de sirocco	Nombre de jours
1999	06-07 du mois	2
	38,88°C   36,11°C	
2000	16-17-18 du mois	3
	34,72°C   34,88°C   35,61°C	
2005	06-07 du mois	2
	37°C   36,11°C	
2009	01-03 du mois	3
	36,11°C   36,72°C   34°C	
2010	17-18 du mois	2
	36,27°C   37°C	
2011	01-02 du mois	2
	38,72°C   43°C	
2012	22-24 du mois	3
	40,22°C   39°C   37°C	
2015	14-16 du mois	3
	35,88°C   37°C   42,27°C	
2022	03-04 du mois	2
	39°C   39,61°C	
2022	07-08 du mois	2
	38,77°C   39°C	

La figure et le tableau récapitulatifs (Fig. 5.5, Tab. 5.9) montrent que c'est pendant le mois d'août de la période 1990-2022 qu'on enregistre le nombre le plus important des jours de sirocco, 72 jours (Fig. 5.5, Tab. 5.9). Le rapport de la fréquence entre le nombre de jours de sirocco pendant le mois d'août et celui de juin-juillet et septembre est respectivement de 1,04 et 1,41. Cependant, la séquence la plus étendue des jours de sirocco est enregistrée au mois de juin et ce du 18 au 22 juin 2006 (avec des températures maximales qui ont atteint respectivement 37°C, 38,27°C, 39,27°C, 40°C et 42,88°C).



**Figure 5. 5. Nombre des jours de sirocco par mois et par année**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

**Tableau 5. 9. Comparaison des jours de sirocco par mois de la saison chaude de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Mois	Nb. Total des jours	Nb. Total réel des jours	NB. des jours de sirocco	% des jours de sirocco	Coefficient de variation
<b>Juin</b>	990	990	69	6,96	365,53
<b>Juillet</b>	1023	1022	69	6,75	371,82
<b>Août</b>	1023	1021	72	7,05	363,22
<b>Septembre</b>	990	983	51	5,19	427,70

## 2. Caractéristiques météorologiques du sirocco

Pendant les jours de sirocco, la Tunisie est sous l'effet d'un flux oscillant entre sud sud-est et ouest sud-ouest dû à l'extension vers le nord de l'anticyclone subtropical. L'air saharien est très chaud et sec. L'humidité relative minimale ne dépasse pas les 30% et les températures maximales peuvent atteindre les 43°C pour le mois de juin, 45,6°C pour le mois de juillet, 48,8 pour le mois d'août et 43°C pour le mois de septembre. La visibilité est généralement entre 6-8 km et la vitesse moyenne du vent est de l'ordre de 2,6 m/s, mais la vitesse maximale peut atteindre 5,7 m/s (Tab. 5.10).

**Tableau 5. 10. Nombre de jours de sirocco et vitesse du vent par mois de la saison chaude de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Mois	Nb des jours de sirocco	Vitesse minimale du vent (m/s)	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse maximale du vent (m/s)
Juin	69	1	2,70	5,7
Juillet	69	1	2,62	5,1
Août	72	0,5	2,24	5,1
Septembre	51	1	2,97	5,1
<b>Total général</b>	<b>261</b>	<b>0,5</b>	<b>2,60</b>	<b>5,7</b>

**Comparaison avec les données météorologiques de la station DAVIS installée au centre-ville de Bizerte (07/08-21/09/2020) :** Les filtres de sélection des jours de sirocco ont été appliqués sur les données météorologiques de la station DAVIS installée au centre-ville de Bizerte durant la période allant du 07 août au 21 septembre 2020. Cette sélection a fait ressortir un seul jour répondant à tous les critères à la fois (Tab. 5.11). Il s'agit du 14/08/2020 (Direction du vent 218,52°, Vitesse du vent 1,51 m/s, humidité relative minimale 29% et écart entre la température maximale (39,2°C) et la normale du mois (33,24°C) égale à 6°C. Ce jour est reporté aussi par les données METAR de l'aérodrome de Sidi Ahmed comme jour de sirocco. Les réanalyses ERA5 de ECMWF/CEP évoquent un vent du sud-ouest. Une situation qui résulte d'une dorsale barométrique en altitude et en surface d'une orientation sud-ouest nord-est.

Il est à rappeler qu'un vent du sud-est peut ne pas être identifié comme du sirocco sur un site littoral d'observation et de mesure comme celui de la station DAVIS installée au centre-ville de Bizerte, surtout s'il est « avancé dans la mer » (Ben Boubaker, 1998). Selon le même auteur, un « Chlouk » (du sud-est) qui traverse la mer voit ses caractéristiques hygrothermiques modifiées. Il peut se convertir en sirocco en s'introduisant dans les régions continentales de la Tunisie. On peut ici évoquer l'exemple du 13 août 2020.

D'après les données de la station de Sidi Ahmed, ce jour répond aux critères de sélection des jours de sirocco (humidité relative : 22%, direction du vent : 165° (sud sud-est), vitesse du vent : 3,9 m/s, écart entre l et la normale du mois : 8,7 °C. Le même jour à la station DAVIS du centre-ville de Bizerte, sous l'effet de son passage sur la mer, le vent du sud-est (même direction reportée par les réanalyses ERA5 de ECMWF/CEP) s'est chargé d'humidité qui n'a pas descendu en dessous de 32% (cette valeur est atteinte seulement à 12h30. Une heure après, elle était de 50%) ce qui l'écarte de la sélection des jours de sirocco. Comme mentionné par Ben

Boubaker (1998), le passage du « Chlouk » sur la mer « contribue à rafraîchir les températures ». En effet, alors que la température maximale à la station de Sidi Ahmed (distante de la côte orientale de presque 10 km) a atteint 42°C à 14h, elle était à la station DAVIS du centre-ville (distante de la mer de 1,3 km) de 36,3°C (la température maximale du jour est atteinte à 13h et était égale à 39,9°C).

Pour le mois de septembre de la période commune d'enregistrement entre les deux stations (07/08-21/09/2020), aucun jour de sirocco n'a pu être identifié à la station DAVIS. C'est le critère de l'humidité relative minimale (qui doit être < 30%) qui est le plus décisif (la valeur minimale de l'humidité relative de toute la période du 01-21 septembre 2020 était de 38%, atteinte le 18/09/2020 à midi avec une température de 31,2°C).

**Tableau 5. 11. Comparaison des données météorologiques des deux stations pour la journée du 14/08/2020**

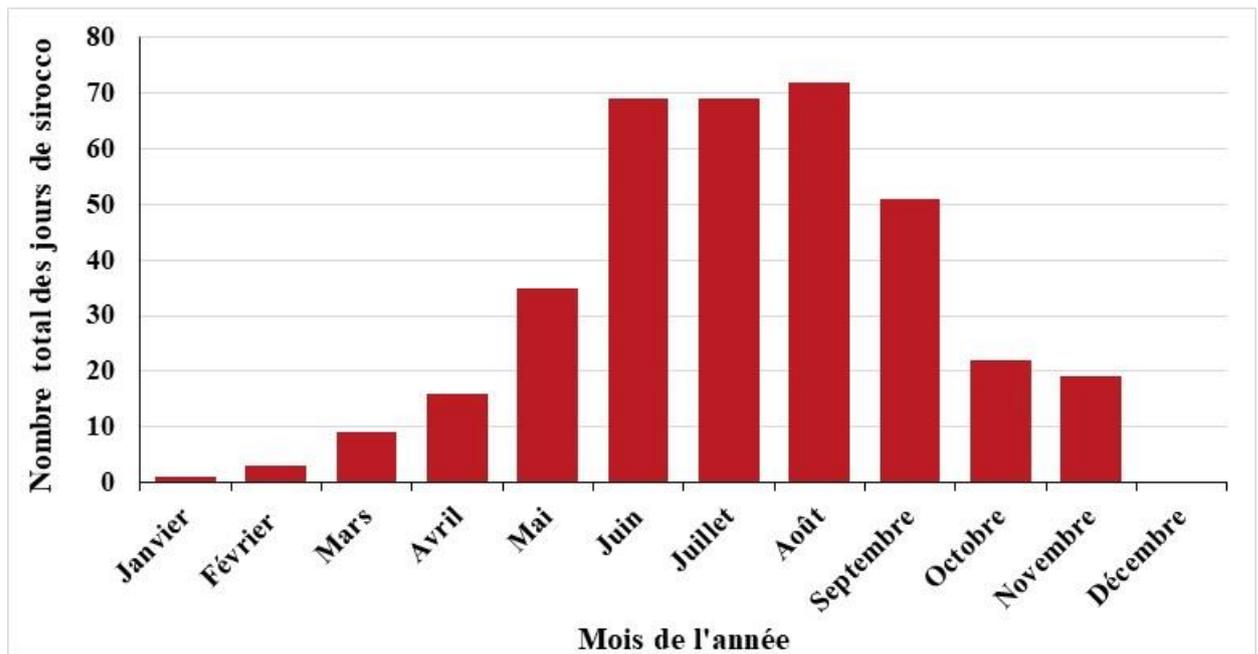
(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Station météo.	La température maximale (TMAX) (°C)	Ecart TMAX-TMAXMOY (°C)	Direction du vent (°)	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative minimale %
Sidi Ahmed	41,22	8	169	2,57	19,19
Davis (Centre-ville)	39,2	6	218,52	1,51	29

### 3. Les types de circulation engendrant le sirocco

Variable en fonction de la saison, le sirocco est plus fréquent pendant la saison chaude (Fig. 5.6), période où une dépression thermique occupe normalement le Sahara, que le sirocco devient fréquent et puissant (Henia, 1980).

Le sirocco est accompagné par une augmentation de la température qui peut dépasser les 48,8°C et un écart entre la température maximale du jour et la température maximale moyenne du mois pouvant dépasser 15°C (ces valeurs sont enregistrées le 10 août 2021 (Tab. 5.12).



**Figure 5. 6. Nombre total des jours de sirocco par mois durant la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

**Tableau 5. 12. Jours des extrêmes de températures enregistrées par jours de sirocco par mois de la période 1990-2022**

(Données journalières INM-METAR téléchargées depuis le site de la NOAA)

Date des températures maximales/mois	Max de la température maximale (°C)	Max de la température maximale - Température maximale moyenne du mois (°C)
26/06/2022	43,8	14,2
<b>31/07/2021</b>	<b>44,6</b>	<b>12,1</b>
<b>10/08/2021</b>	<b>48,8</b>	<b>15,6</b>
02/09/2011	43	13,1

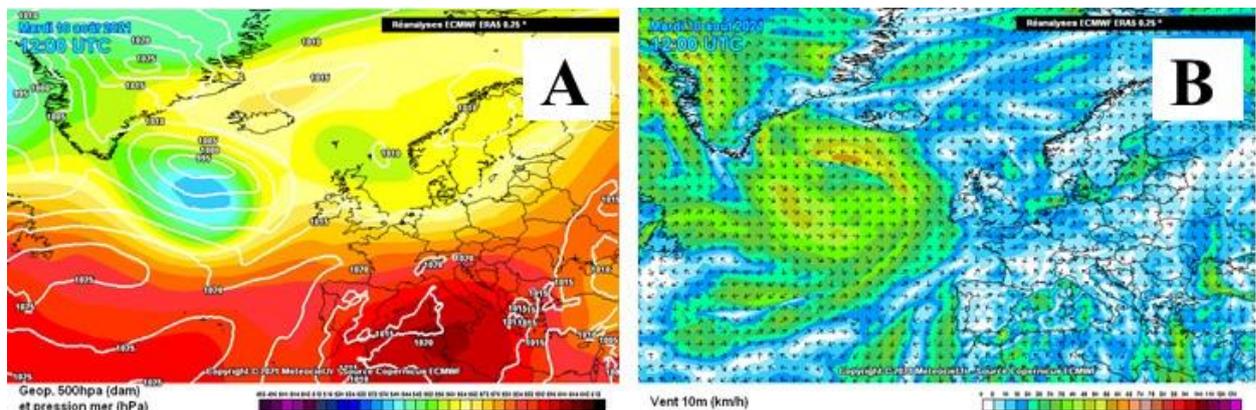
Il s'agit globalement d'une dorsale en altitude (500 hPa) et une dorsale ou marais barométrique en surface. Les jours d'advection de sirocco sont caractérisés par un haut géopotentiel 500 hPa de 592 dam d'altitude et qui couvre la Tunisie. Il traduit l'existence d'un anticyclone en hauteur et se manifeste au niveau de la mer par une dorsale barométrique d'une orientation ouest-est générant un vent du sud-ouest, sud ou parfois sud-est au niveau de Bizerte.

Les températures maximales sont élevées et peuvent dépasser de loin la normale du mois. En effet, la température maximale a atteint et a dépassé les 45°C en milieu de la journée du 10/08/2021 (de 11h à 14h selon la source INM-METAR). Elle a même atteint 48,8°C avec un dépassement de la normale de 15,65°C et ce à midi. Il s'agit d'une journée de sirocco (vent du Sud) entre 1,5 m/s et 3,5 m/s avec un ciel clair, un air sec (Humidité relative de 10% et une

température de point de rosée de 8 °C), une visibilité horizontale de 9 à 10 km et une pression atmosphérique ramenée au niveau de la mer égale à 1014hPa.

En effet, depuis le 09/08/2021 à 00h UTC, un haut géopotential 500 hPa (592 dam ou 5920 m) qui couvre toute la Tunisie, traduisant l'existence d'un anticyclone en hauteur et qui se manifeste au niveau de la mer par une dorsale barométrique d'une orientation est-ouest générant un vent du sud-est au niveau de Bizerte.

Après 36 heures, le 10/08/2021 à 12h UTC (Fig. 5.7), la cellule anticyclonique au niveau du géopotential 500 hPa s'est étalée pour couvrir, avec la Tunisie, la quasi-totalité de l'Algérie et une grande partie de la Lybie. La dilatation de l'air, sous l'effet de la chaleur, a fait que le géopotential a gagné de l'altitude pour atteindre 596 dam. Au niveau de la mer, c'est une dorsale barométrique étalée sur le sud-ouest de la Tunisie et le sud-est de l'Algérie qui a généré un vent du sud-ouest sur Bizerte.



**Figure 5. 7. Cartes du géopotential 500 hPa (A) et du vent à 10 m (B) de la date du 10/08/2021 à 12h UTC**

(Modèle GFS, site web de Meteociel)

Jusqu'au 12/08/2021 à 00h UTC, la situation au niveau du géopotential 500 hPa est restée la même, les vents sur Bizerte oscillent entre ouest sud-ouest, sud sud-est et est sud-est et ce suivant la position des cellules anticycloniques au niveau de la mer qui se détachent et s'attachent aux isobares 1015 hPa et 1020 hPa entre l'ouest de la Tunisie et l'est de l'Algérie.

Le 12/08/2021 à 06h UTC, le vent a changé de direction pour le nord-est et ça a duré toute la journée, mettant fin à cette séquence de jours de sirocco.

Comme évoqué dans la bibliographie (Henia, 1980 ; Dahech *et al.*, 2007 ; Dahech et Beltrando, 2012), le sirocco est un vent chaud et sec. Lorsque les conditions sont favorables, Il peut être associé à un vent de sable qui peut transporter les particules (en fonction de sa vitesse et de leurs tailles) sur de longues distances.

## 4. Les vents de sable associés au sirocco

### 4.1. Définition et genèse

Dahech (2012) définit un vent de sable comme étant « *une forme de lithométéore<sup>28</sup> caractéristique des régions arides et semi-arides. Il s'agit d'un vent relativement fort, déplaçant des particules fines qui peuvent occasionner des gênes respiratoires ou oculaires et de nombreux problèmes pour les activités économiques (notamment les transports) et l'environnement en général* ». Selon le guide des instruments et des observations météorologiques, ce vent de sable se présente essentiellement sous la forme de chasse-sable (poussières ou sable soulevés par le vent au point d'observation ou à ses alentours), de tempêtes de sable et de brume sèche (poussières en suspension dans l'air, non soulevées par le vent au point d'observation, et survenant après le soulèvement des particules (OMM, 1973).

Le vent de sable est typique des latitudes arides et semi-arides (Dubief, 1952 et 1953). C'est un vent fort ramenant des particules dont la granulométrie minimale est de 270 µm. Le vent de sable peut se présenter sous forme de chasse-sable<sup>29</sup> (comme c'est le cas du 17/08/2021 (Fig. 5.12 et Fig. 5.13) en début de l'après-midi, au niveau de Borj Taleb. Le vent de sable peut aussi se manifester sous forme de tempêtes de sable. Ces deux phénomènes associent la dynamique éolienne et le transport des particules (Nouaceur, 1999 et 2001).

La genèse des vents de sable est conditionnée par deux facteurs majeurs : (1) le facteur climatique à travers le vent et la turbulence de l'atmosphère en tant que facteurs d'arrachage et de transport des poussières, (2) le facteur lithologique et pédologique à travers la structure, la stabilité du sol et la taille des particules mobilisables (Oliva *et al.*, 1983 ; Legrand *et al.*, 1989; Coudé-Gaussen, 1990 et 1991 ; Nouaceur, 2004).

Enfin, la pression humaine sur le milieu et particulièrement la dégradation de la flore augmente l'érodibilité des sols (Valentin, 1994). Les pertes en terres dues au vent sont multipliées par quatre lorsque la couverture végétale passe de 40 à 25% (Fryrear, 1985). En fait, la végétation fixe le sol et ralentit le vent et réduit, par la suite, la déflation éolienne.

Les vents de sable sont les principaux vecteurs naturels qui transportent les PM contribuant ainsi à la dégradation de la qualité de l'air (Karagulian *et al.*, 2019). Les recherches indiquent qu'environ 50 % des aérosols présents dans la troposphère sont constitués de poussières

---

<sup>28</sup> Un lithométéore est défini par l'Atlas international des nuages (OMM, 1956) comme « un ensemble de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses et qui se trouvent plus ou moins en suspension dans l'atmosphère ou soulevées par le vent ».

<sup>29</sup> Chasse- sable : « poussière ou sable soulevés par le vent au point d'observation ou à ses alentours au moment de l'observation ».

minérales provenant des principaux déserts du monde (Che *et al.*, 2015 ; Husar *et al.*, 2000).

Aussi, ils sont à l'origine des réactions allergiques, des crises d'asthme, de la respiration chronique, des problèmes pulmonaires ainsi que des maladies cardiovasculaires et cardiaques. On a estimé que la quantité annuelle de poussière du désert qui provoque des migrations aériennes régionales ou mondiales est de 0,5 à 5,0 milliards de tonnes (Perkins et Thorns, 2001 ; Dahech et Beltrando, 2012).

Les vents de sable sont également des transporteurs de micro-organismes, dont certains sont hautement pathogènes pour l'homme et pour les animaux. Les micro-organismes sont des habitants naturels des sols et des sables de la surface supérieure et comprennent des bactéries, des champignons, des spores fongiques et des virus.

Les particules de poussière sont susceptibles de provoquer une abrasion de la muqueuse nasopharyngée chez l'homme et favorisent ainsi les infections microbiennes par inhalation (Molesworth *et al.*, 2002). Par exemple, les épidémies de méningite dues à une infection à *Neisseria meningitidis* sont liées aux tempêtes de poussière qui sont des événements courants pendant la saison sèche en Afrique du Nord (Molloy et Mihaltcheva, 2013).

Des hypothèses sur le rôle du climat, notamment les vents de sable, dans l'introduction en Italie des animaux ou embryons de zones infectées ou suspectées par le virus de la « langue bleu » (en anglais Bluetongue BTV) ont été évoquées par Calistri *et al.* en 2004.

En septembre 2023, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) a publié son rapport annuel sur l'incidence et les dangers des tempêtes de sable et de poussière, ainsi que leurs impacts socio-économiques. Le rapport examine également comment le changement climatique pourrait potentiellement augmenter les points chauds des tempêtes de sable et de poussière.

Au-delà des frontières des pays, cette prise de conscience, a amené l'OMM à instaurer des structures institutionnelles permanentes faisant partie du « Système d'avertissement et d'évaluation des tempêtes de sable et de poussière (en anglais Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS)) vise à fournir aux utilisateurs des prévisions, des observations et des connaissances en temps opportun et de haute qualité sur les tempêtes de sable et de poussière.

Les efforts de l'OMM en matière de fourniture d'informations sur les tempêtes de sable et de poussière sont reconnus au niveau des Nations Unies. L'OMM dirige les activités de

prévision et d'alerte précoce au sein de la Coalition des Nations Unies pour lutter contre les tempêtes de sable et de poussière.

L'Afrique du Nord contribue à elle seule à plus de 50 % des émissions mondiales de poussières et est considérée comme la région source active de poussières au niveau mondial (Goudie et Middleton, 2001 ; Ginoux *et al.*, 2012).

En Tunisie, l'Institut National de la Météorologie (INM) a fixé les critères suivants pour différencier les lithométéores : la vitesse du vent est inférieure à 5 m/s pour les brumes de sable, alors qu'elle est comprise entre 5 et 10 m/s en cas de vent de sable et qu'elle dépasse 10 m/s en cas de tempête de sable. La visibilité est inférieure à 5 km en cas de brume de sable, inférieure à 3 km en cas de chasse-sable et inférieure à 1 km en cas de tempête de sable (El Melki, 2010).

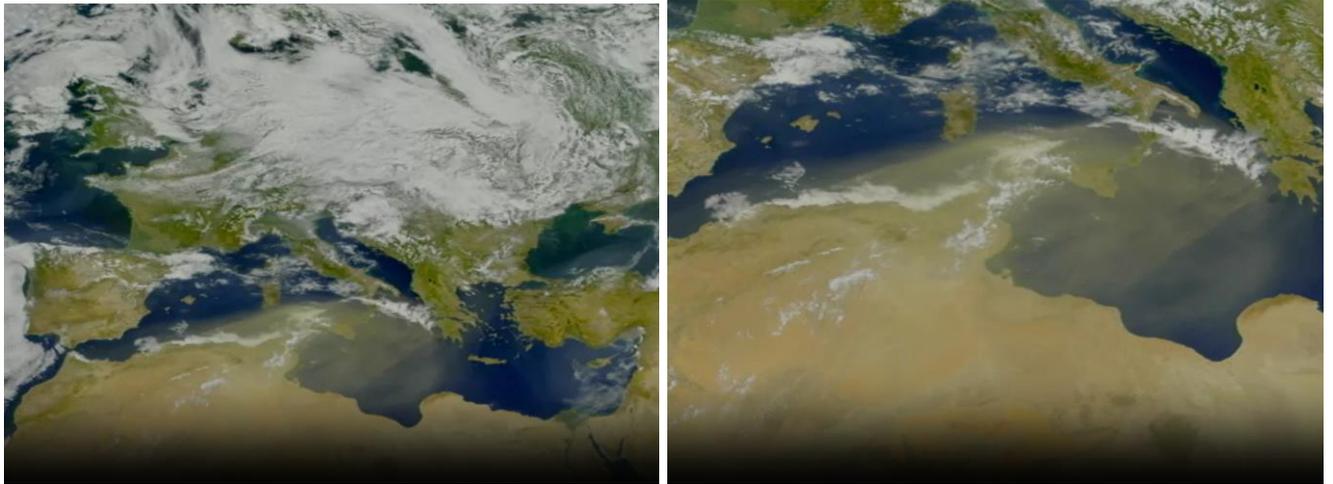
Dans ce qui suit on va évoquer le type de circulation responsable de l'advection des vents de sable pendant la saison chaude.

#### **4.2. Les types de circulation engendrant le vent de sable**

Pour aborder cette analyse, nous nous sommes basés essentiellement sur les images satellitaires montrant des tempêtes de sable à Bizerte. Puis nous avons regardé les configurations isobariques en surface et en altitude afin d'étudier les circulations atmosphériques qui leurs sont associées. Il s'agit, en détail, de ceux décrits à travers les cas suivants :

##### **1-Une dorsale barométrique en altitude et une dépression à l'est de la Méditerranée : cas du 18 juillet 2000 :**

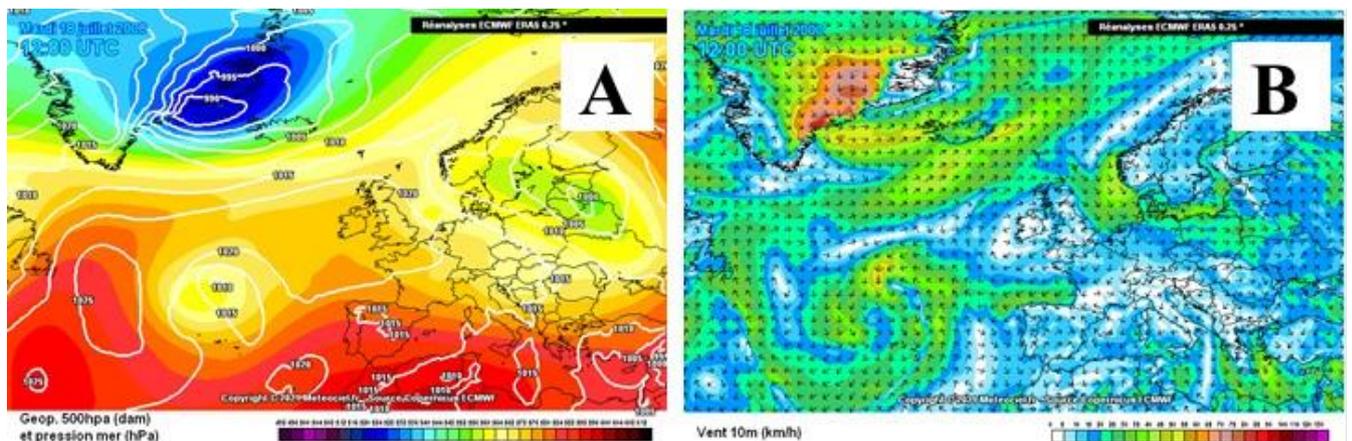
Le 18 juillet 2000, les images du satellite GeoEye montrent une tempête de sable couvrant les pays du Maghreb et l'ouest de la Lybie. Elle traverse la Méditerranée et atteint l'Italie (Fig. 5.8).



**Figure 5. 8. Une importante tempête de sable quitte l'Afrique du Nord et traverse la Méditerranée pour se diriger vers l'Europe, le 18 juillet 2000**

(Données SeaWiFS, DigitalGlobe et GeoEye, 2000)

Une telle tempête est favorisée par une circulation atmosphérique et un état moyen de l'atmosphère bien définis. En effet, le vent a soufflé du sud-ouest (06 h) à nord nord-ouest (21h) avec une vitesse modérée à forte dont la moyenne était de 4,63 m/s et le maximum de 8,23 m/s. Même si le vent n'est pas très fort, c'est la disponibilité des particules de faibles tailles qui explique le fait que ce vent a traversé la Tunisie et a atteint l'Italie et la Grèce. La dépression sur le bassin oriental de la Méditerranée aspire l'air saharien remonté par une dorsale persistant à 500 hPa dont l'axe est orienté sud-ouest nord-est (Fig. 5.9).

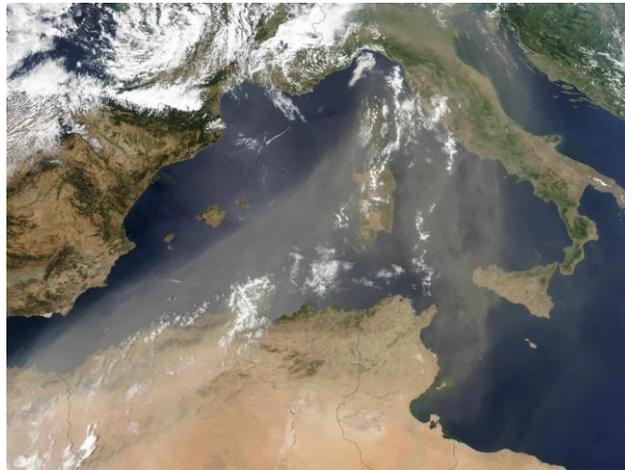


**Figure 5. 9. Cartes du géopotiel 500 hPa (A) et du vent à 10 m (B) de la date du 18/07/2000 à 12h UTC**

(Modèle GFS, site web de Meteociel)

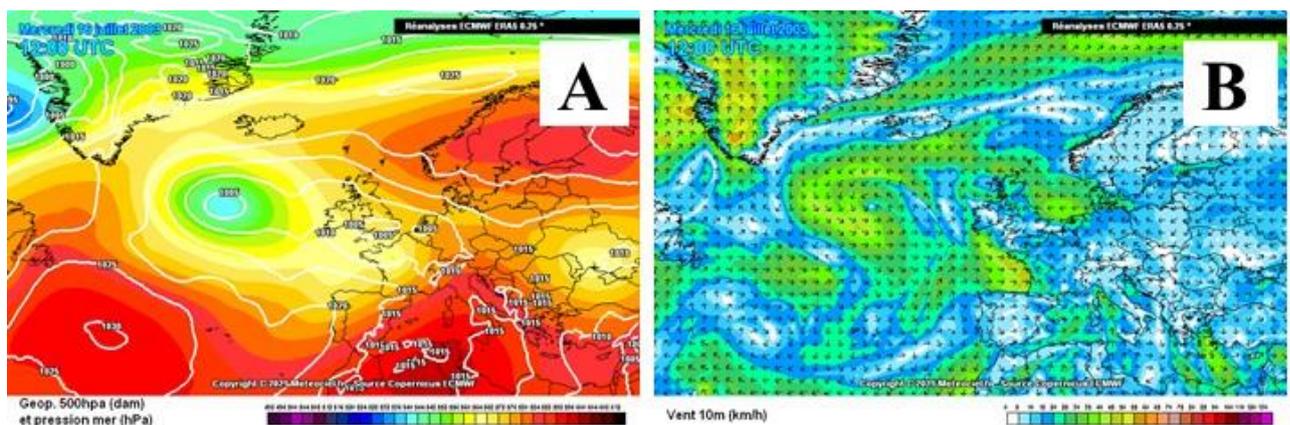
## 2- Une dorsale en altitude et un col barométrique sur l'Europe centrale : Cas du 16 juillet 2003 :

Ce jour, le spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) du satellite Aqua a capturé cette image de la poussière saharienne au-dessus de la mer Méditerranée et vers le nord-est jusqu'en Italie (Fig. 5.10).



**Figure 5. 10. Poussière saharienne sur la mer Méditerranée au-dessus de la mer Méditerranée et vers le nord-est jusqu'en Italie**  
(NASA/GSFC, Image MODIS<sup>30</sup> du satellite Aqua, 16 juillet 2003)

Cette situation résulte d'une dorsale orientée sud /nord son axe traverse l'Italie pour attendre l'Europe centrale où domine un col isobarique en surface. À Bizerte, les données météorologiques enregistrées ce jour évoquent un vent moyen d'une vitesse de 3,6 m/s et une direction ouest nord-ouest. La vitesse maximale du vent a atteint 8,7 m/s.

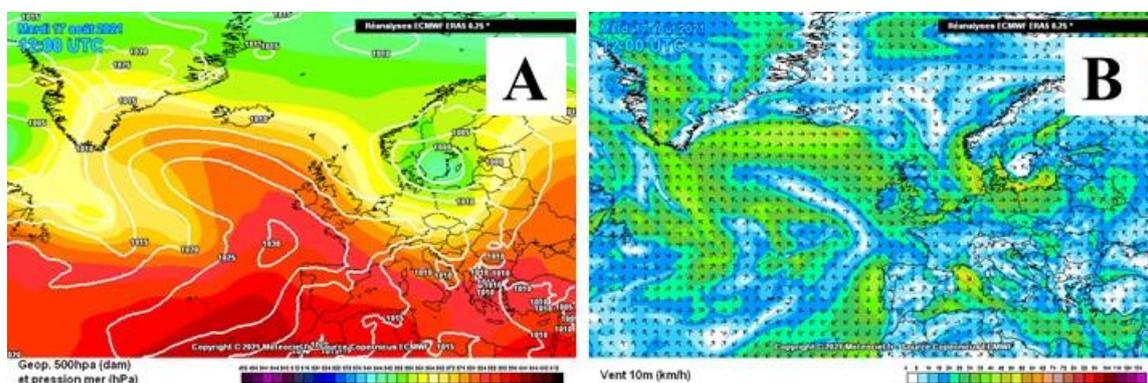


**Figure 5. 11. Cartes du géopotiel 500 hPa (A) et du vent à 10 m (B) de la date du 16/07/2003 à 12h UTC**  
(Modèle GFS, site web de Meteociel)

<sup>30</sup> Spectroradiomètre imageur à résolution moyenne

### 3- Une dépression sur l'Adriatique : Cas du 17 août 2021 :

Ce jour, lors d'une campagne de mesures semi-itinérante, nous avons observé un phénomène de chasse-sable a été observé en début de l'après-midi au niveau de Borj Taleb à Bizerte. Un site au niveau duquel la route est débitumée et non arrosée. Ce jour les  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$  ont atteint respectivement 35 et  $78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La configuration barométrique en altitude montre un haut géopotiel en altitude et un vent du secteur sud en surface aspiré par une dépression active sur l'Adriatique (Fig. 5.12). La vitesse du vent a oscillé entre 5,6 m/s et 10 m/s de la composante ouest, une pression au niveau de la mer de 1014 hPa et une visibilité entre 8 et 9 km. Il s'agit d'un remaniement de la poussière et du sable sur le site de et de ses environs. Le site de mesure au niveau duquel on a observé le chasse-sable se trouve en aval d'un couloir topographique d'une longueur de 1,5 km descendant d'une carrière de ciment avec un dénivelé longitudinal d'une centaine de mètres et un dénivelé transversal global de presque 15 mètres (Fig. 5.13).



**Figure 5. 12. Cartes du géopotiel 500 hPa (A) et du vent à 10 m (B) de la date du 17/08/2021 à 12h UTC**

(Modèle GFS, site web de Meteociel)



**Figure 5. 13. Coupes longitudinale et transversale montrant le couloir topographique entre la carrière de ciment et le site de Borj Taleb**

(Google Earth)

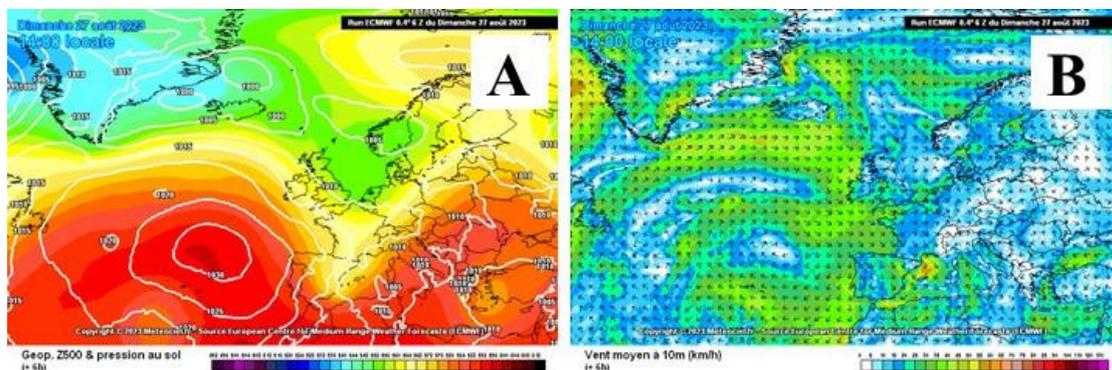
#### 4- Une dorsale en altitude et une dépression en surface sur le nord de la Tunisie : cas du 27 août 2023 :

Le 27 août 2023, la Businessnews (Businessnews, web, 27/08/2023) reporte qu'après une journée très chaude et des températures dépassant les 40 degrés, des vents forts ont soufflé ce dimanche 27 août 2023, sur le Grand Tunis. Il a atteint aussi Bizerte avec une orientation sud à sud-ouest. Le vent d'une vitesse qui a atteint 20 m/s a soulevé le sable et la poussière engendrant une visibilité quasi nulle (Fig. 5.14). La nébulosité était égale à 7/8 octas. Le vent de sable de ce jour est associé à un sirocco. La température a oscillé entre 40°C à 11h et 46°C à 14h. et l'humidité relative était inférieure à 30%.



**Figure 5. 14. Photos de la tempête de sable du 27/08/2023 sur le Grand-Tunis : Visibilité quasi nulle** (on voit en haut à droite de la photo de droite un objet soulevé par le vent fort)  
(Businessnews, web)

La configuration barométrique responsable de ce vent de sable résulte, en altitude, d'un talweg barométrique sur la France bordé par une dorsale orientée sud/nord sur la Tunisie et qui traverse la Méditerranée pour atteindre l'Europe centrale en passant par l'Italie. En surface la dépression au Nord de la Tunisie rend l'air instable et aspire un vent fort venant du sud. (Fig. 5.15. à droite).



**Figure 5. 15. Cartes du géopotiel 500 hPa et du vent de la date du 27/08/2023 à 14h (heure locale)**  
(Modèle GFS, site web de Meteociel)

## **Conclusion**

Le sirocco est l'un des vents régionaux qui marquent le climat du bassin méditerranéen surtout sur sa bordure Sud et Est. L'étude des types de circulation à sirocco donne des exemples de l'importance des circulations méridiennes.

L'étude fréquentielle du sirocco a montré que ce vent est plus fréquent au mois d'août, alors que la séquence la plus persistante est enregistrée au mois de juin. Les vents de sable sont moins fréquents en Tunisie. Ils sont encore plus rares dans le nord du pays. Certaines configurations isobariques sont favorables à son advection. Une étude détaillée de ce phénomène apportera plus d'éléments de réponse concernant les statistiques sur ses fréquences et sa typologie (vent de sable, chasse sable, brumes sèches).

## **PARTIE 3**

# **CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE A BIZERTE**

## **CHAPITRE 6**

# **ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE QUELQUES POLLUANTS A BIZERTE**

La pollution atmosphérique, notamment en milieu urbain, représente une cause importante de problèmes sanitaires, y compris les décès prématurés (OMS, 2022, web).

Dans beaucoup de pays, y compris la Tunisie, les concentrations des polluants gazeux tels que le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et des particules (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) sont réglementées, ce qui implique que des politiques de réductions d'émissions sont mises en place pour diminuer ces concentrations dans les lieux où la réglementation correspondante n'est pas respectée (NT 106.04, 1994 ; Directive UE 2015/1480, 2015). Par ailleurs, la pollution atmosphérique peut contribuer à la contamination d'autres milieux, comme le sol et les eaux de ruissellement. Certaines sources accusent les activités des ports et des navires circulant dans la Méditerranée pour leur rôle non seulement dans la contamination des eaux de la mer, mais aussi dans la dégradation de la qualité de l'air dans certaines villes côtières de la rive sud de la Méditerranée (UNEP, 2021 ; UNEP, web « Stratégie à moyen terme du PNUE/PAM pour 2022-2027 »).

Dans son rapport de 2018 (Rapport et fichier Excel, inspiré des travaux de Bouchlaghem et Nsom, 2012), l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) classait la Tunisie parmi les 10 pays africains les plus pollués, en se basant sur des données recueillies à Tunis, Sousse et Bizerte (OMS, 2018).

Les activités anthropiques (environnement industriel, trafic routier, comportement et habitudes socio-économiques) couplées avec les conditions climatiques et topographiques qui caractérisent un espace considéré peuvent contribuer largement à des transformations, parfois majeurs, dans la qualité de son air (AIRPARIF, Comprendre les polluants de l'air, web)

Comme beaucoup de villes portuaires du bassin méditerranéen, Bizerte au nord-est de la Tunisie est l'un de ses plus importants pôles industriels. Une industrie qui se trouve au sein même de son tissu urbain (MEHAT, 2011).

L'espace considéré est hétérogène et est caractérisé par des entités géographiques complexes (bâti ancien côtoyant un bâti plus moderne, zones résidentielles, commerciales, industrielles, axes routiers, arrière-pays rural, ...), des émissions de polluants atmosphériques variables et par conséquent une exposition de la population à la pollution qui est variable dans l'espace et le temps (MEHAT, 2011 ; CITET, web).

Certains polluants ont des temps de vie long et peuvent rester plusieurs semaines dans l'atmosphère (PM<sub>2,5</sub>) et donc être acheminés sur de longues distances, d'autres au contraire, sont plus locaux (NO<sub>x</sub> proche du réseau de trafic routier). La répartition spatiale d'un polluant dépend de plusieurs facteurs. La qualité de l'air, elle, dépend fortement des conditions

météorologiques, de la topographie, de l'agencement de l'espace urbain et des émissions (Cariolet *et al.*, 2019 ; Michelot *et al.*, 2014).

Les activités anthropiques (environnement industriel, trafic routier, comportement et habitudes socio-économiques) couplées avec les conditions climatiques et topographiques qui caractérisent l'agglomération de Bizerte (comme dans la plupart des pôles industriels en Tunisie) ont contribué largement à des transformations, parfois majeurs, dans la qualité de son air (Dahech et Charfi, 2017). Ces transformations sont ressenties à plusieurs niveaux, notamment la santé humaine (OMS, web ; CITET, Alertes n° 307, web)

L'objectif de ce chapitre est de pouvoir comprendre la répartition spatio-temporelle de la pollution atmosphérique et cartographier la qualité de l'air à plusieurs échelles (agglomération, quartier). Cette étude vise aussi à cerner la part des éléments naturelles (caractéristiques météorologiques, environnement topographique, distance à la mer, ...) et de l'action anthropique dans la définition des niveaux de concentration des différents polluants étudiés (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, les PM et CO<sub>2</sub>).

La pollution photochimique (ozone troposphérique) sera traitée dans un chapitre à part. Elle sera aussi le thème d'application pour la modélisation statistique et cartographique (Annexe 1).

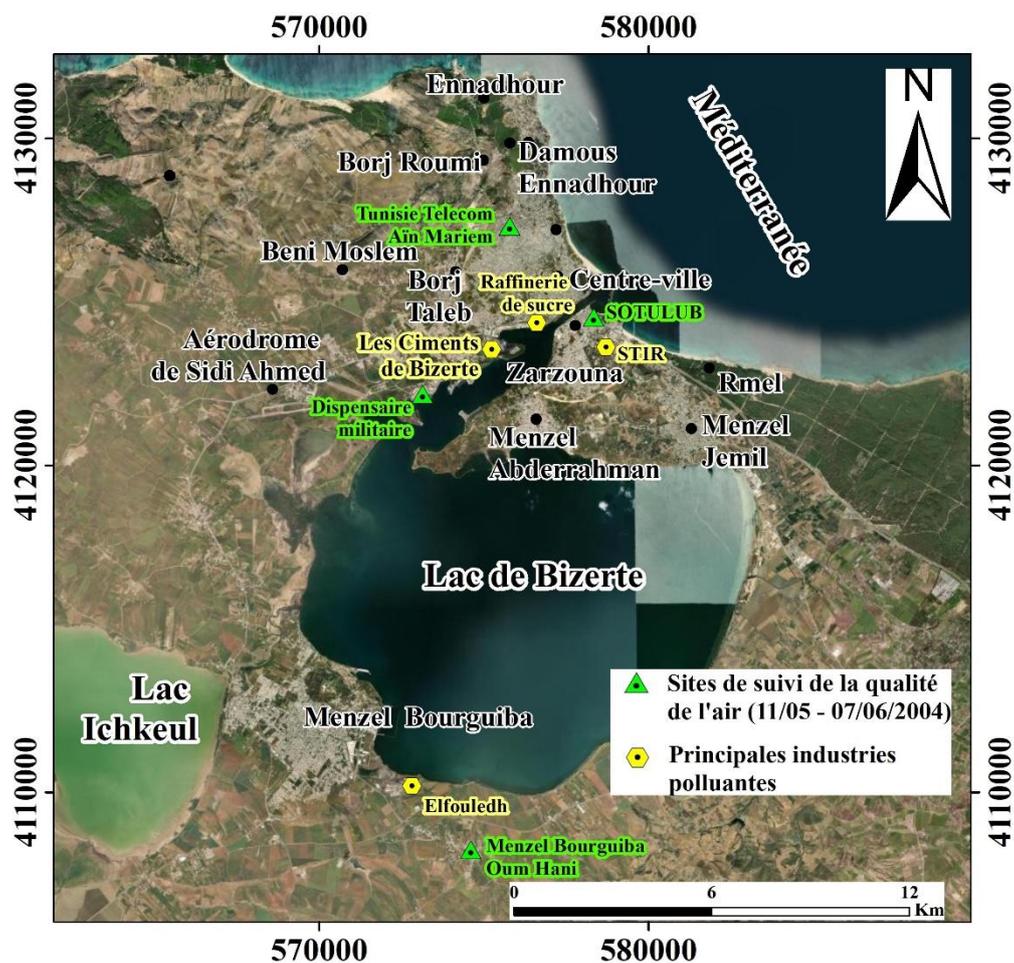
## **1- Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)**

Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) est émis lors de la combustion de matières fossiles, telles que le charbon, le pétrole et certains gaz contenant des impuretés en soufre, et lors de certains procédés industriels tels que ceux liés à la production d'énergie comme les centrales de raffinerie de pétrole (AIRPARIF, web). Mais il est également émis par le chauffage résidentiel, commercial ou des entreprises (AIRPARIF, web). A Bizerte, ville industrielle, ces sources de pollution émettrices de SO<sub>2</sub> se trouve au sein même de l'agglomération. Sa concentration dans l'air dépend de plusieurs facteurs dont la distance à la source de pollution, les conditions météorologiques (direction et vitesse du vent, couche d'inversion, conditions barométriques, ...), caractéristiques topographiques du site de mesure (couloir topographique, blocage contre une élévation, ...)

### **1.1- Variabilité temporelle du SO<sub>2</sub> :**

Pour l'étude de la variabilité temporelle de n'importe quel polluant, il faut avoir une bonne couverture de données. Dans notre cas, à cause de problèmes techniques de différentes catégories (essentiellement coupure d'alimentation en électricité du capteur SO<sub>2</sub>) nous n'avons pas pu acquérir les données nécessaires pour aborder cette question.

De ce fait, on va se baser sur les données enregistrées par le laboratoire mobile de l'ANPE (Fig. 6.1, tab. 6.1).



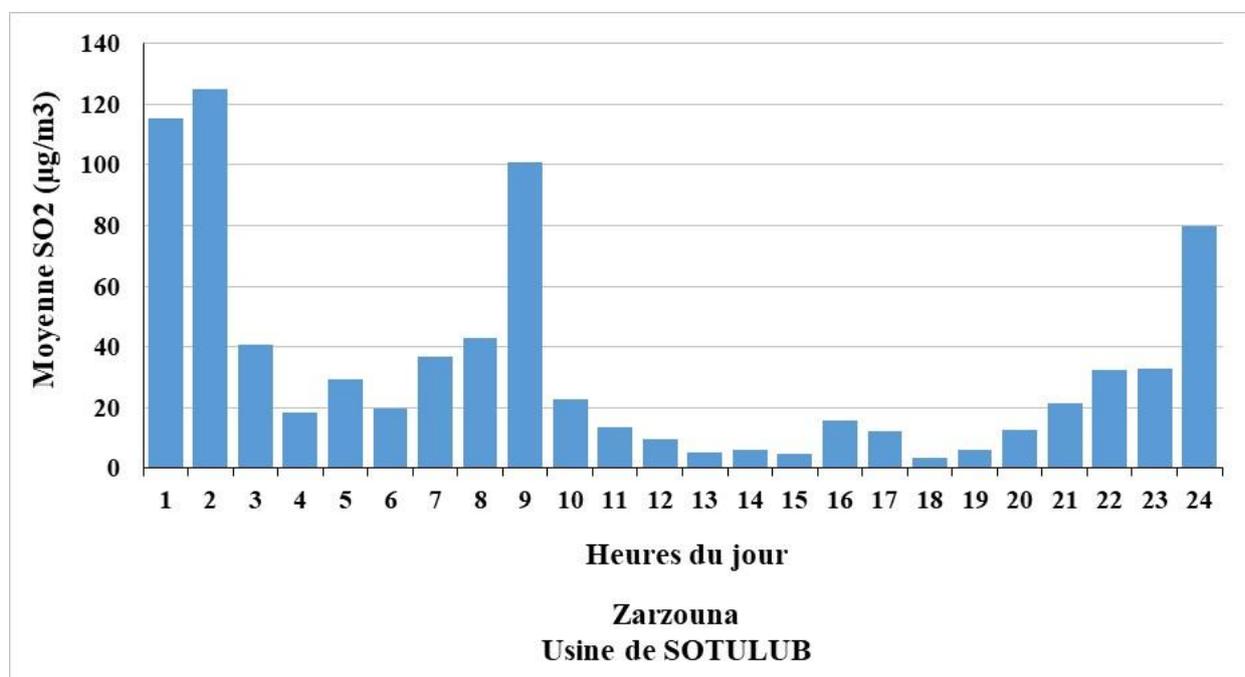
**Figure 6. 1. Sites de la campagne de mesure réalisée du 11/05/2004 à 07/06/2004 moyennant un laboratoire mobile**  
(Google Earth)

**Tableau 6. 1. Périodes des différentes campagnes de mesures réalisées sur quatre sites, moyennant un laboratoire mobile**  
(Données ANPE)

Région	Site	Période
Zarzouna	Usine de SOTULUB	Du 11/05/04 au 19/05/04
Bizerte Nord-Aïn Meriem	Agence Tunisie Télécom	Du 19/05/04 au 24/05/04
Bizerte sud – pêcheurie	Dispensaire militaire	Du 24/05/04 au 31/05/04
Menzel Bourguiba – Oum Hani	Ecole primaire	Du 31/05/04 au 07/06/04

A une échelle temporelle quotidienne, les sites présentent des graphiques de moyennes et de maximas semblables. En effet, les quatre sites présentent trois pics au cours de la journée. Le pic le plus important est enregistré à 9h, sauf pour le site du dispensaire militaire à Bizerte Sud (son pic est à 11h).

Comparé aux autres sites, celui de Zarzouna (Fig. 6.2) s'individualise : trois pics (on peut dire aussi qu'ils sont au nombre de deux si on considère que celui 01h-02h est la continuité de celui de minuit). Aux heures de ces pics, les moyennes sur 01 heure ou sur 03 heures consécutives n'ont pas dépassé le seuil d'information ( $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Seuil indiqué par Scalair, web). Aux mêmes heures, on peut observer une suite de dépassements du seuil de l'OMS ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dans la période nocturne de minuit à 03 h. La cause la plus probable vient du fait que le site de Zarzouna se trouve à proximité d'une source importante de pollution de l'air qui est l'usine de raffinerie de pétrole STIR et que les conditions météorologiques sont favorables à l'accumulation des polluants (inversion thermique). Il à noter que l'odeur de soufre a été signalée dans nos fiches de campagnes matinales (07h30) de mesures semi-itinérantes les 16 et 17 août 2021 (exemple : l'inversion thermique sur l'émagramme du 16/08/2021 avec un vent du sud sud-ouest d'une vitesse de 1,5 m/s, une température de  $28^\circ\text{C}$  et une humidité relative de 62%).



**Figure 6. 2. Variabilité quotidienne du SO<sub>2</sub> sur le site de l'usine de SOTULUB à Zarzouna**

(Données ANPE du 11/05/2004 au 19/05/2004)

Le site du dispensaire militaire à Bizerte Sud connaît un pic retardé (vers 11h à 12h) par rapport aux autres sites et ce sous l'effet de la distance qui le sépare aux sources de pollution les plus proches, mais aussi à cause de la distance qui le sépare de la mer (la brise de mer n'arrive que vers midi). Ce site est sous l'impact de quatre sources de pollution (la STIR, la sucrerie, les Ciments de Bizerte et plus loin au sud l'usine Elfouledh). Au niveau de site, les pics des maximas avoisinent les  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Quant aux moyennes, elles dépassent de peu les  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 1.2- Variabilité spatiale du $\text{SO}_2$ :

Pour bien cerner la variabilité spatiale du  $\text{SO}_2$ , il est nécessaire de scinder la journée en trois périodes : matin (Fig. 6.3), après-midi (Fig. 6.4) et soir (Fig. 6.5). Il s'agit des données des campagnes de mesures semi-itinérantes réalisées :

- Du 15 au 21 août 2021 de différents polluants ( $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$ ). Au total, 192 mesures sont effectuées à l'échelle de l'agglomération de Bizerte.
- Du 20 au 21 août 2021 on a effectué des mesures des mêmes polluants ( $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$ ) à une échelle plus fine (quartier européen). Au total, 70 mesures sont effectuées
- Du 03 au 05 mai 2022 aux alentours de la Médina de Bizerte et le quartier européen ( $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{O}_3$ ) : 45 mesures effectuées
- Du 15 au 21 août 2022 :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$  à l'échelle de l'agglomération de Bizerte. Globalement 250 mesures sont effectuées
- Du 16 au 21 août 2022 on a effectué des mesures des mêmes polluants ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$ ) à une échelle plus fine (quartier européen). Globalement 240 mesures sont effectuées

Il est à noter que certaines mesures n'ont pas pu être effectuées (surtout le soir) à Bizerte (sud du pont), notamment à Zarzouna, pour des raisons de sécurité. Aussi, à cause des restrictions de circulation décrétées en liaison avec la pandémie COVID 19, les mesures semi-itinérantes nocturnes (après 22h) pendant l'été 2021 ont été remplacées par une campagne qui se termine à 21h30, mais aussi consolidées par celles de l'été 2022.

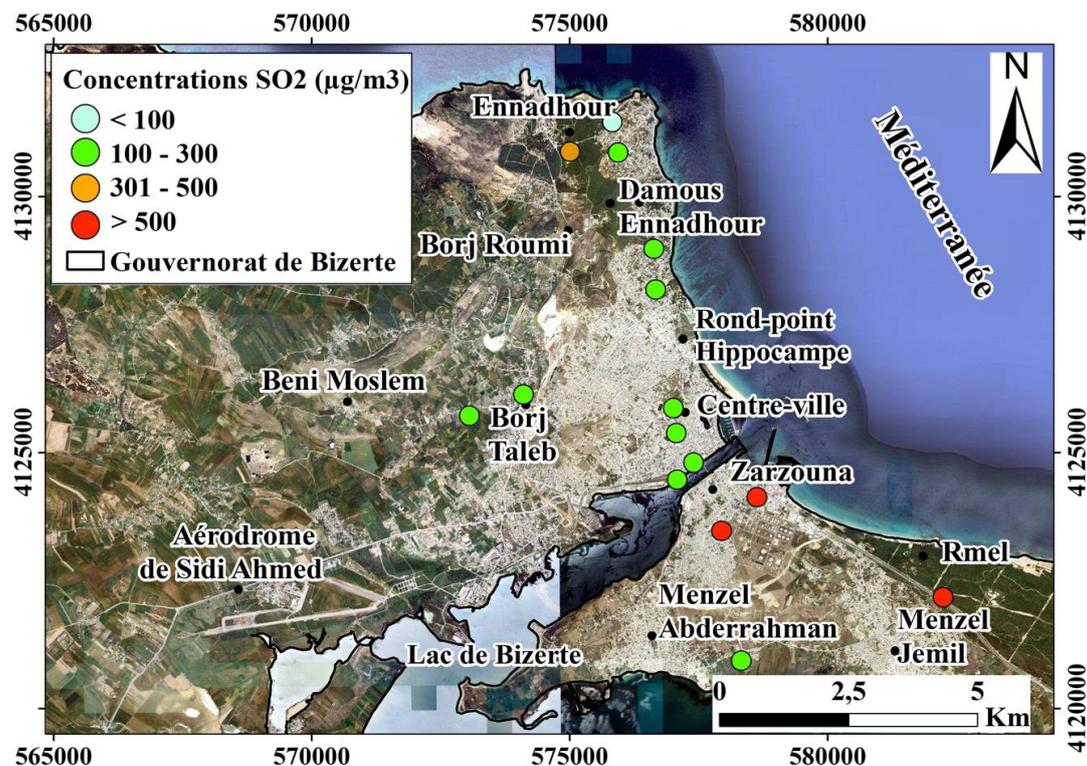
Les analyses des données matinales montrent des points noirs qui se situent essentiellement aux alentours de la raffinerie de pétrole STIR, mais aussi à l'intersection entre l'autoroute vers Tunis et l'entrée à la forêt de Rmel. Ces trois points enregistrent un dépassement de  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Un autre site où on a enregistré un dépassement de  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se situe aussi au niveau d'une forêt, mais au nord au niveau d'Ennadhour.

Cette situation s'explique par le fait que la raffinerie du pétrole est une industrie polluante qui compte parmi ses dégagements le  $\text{SO}_2$ . Il est à noter qu'à maintes reprises on a senti l'odeur du soufre en passant à côté de la STIR (ça nous rappelle la situation aux alentours de l'usine de phosphogypse à Gabes où même si les odeurs des dégagements sont semblables, les concentrations à Gabes sont trois fois plus importantes :  $\approx 1500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Berriche, 2023).

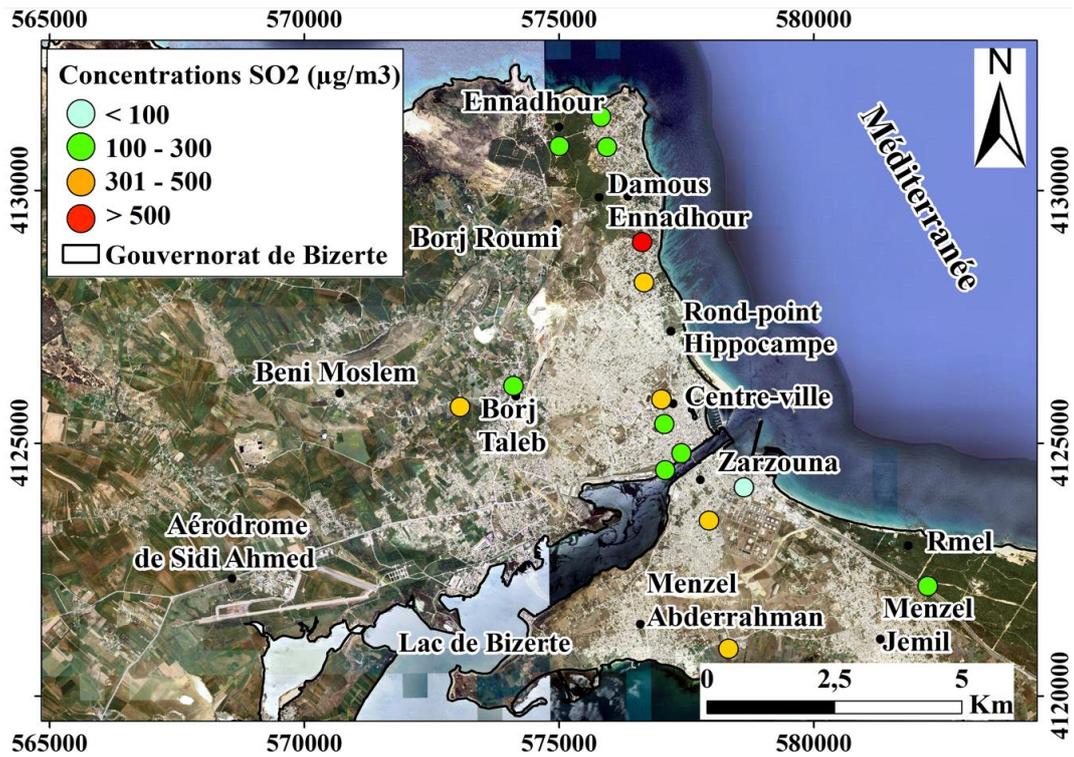
Le centre-ville et la corniche ne sont pas très engorgés à cette heure-ci et les dégagements des moyens de circulation ne sont pas encore très importants.

Pour les sites à concentrations importantes dans les forêts, il s'agit fort probablement d'un stockage de  $\text{SO}_2$  antérieur à l'heure de mesure.



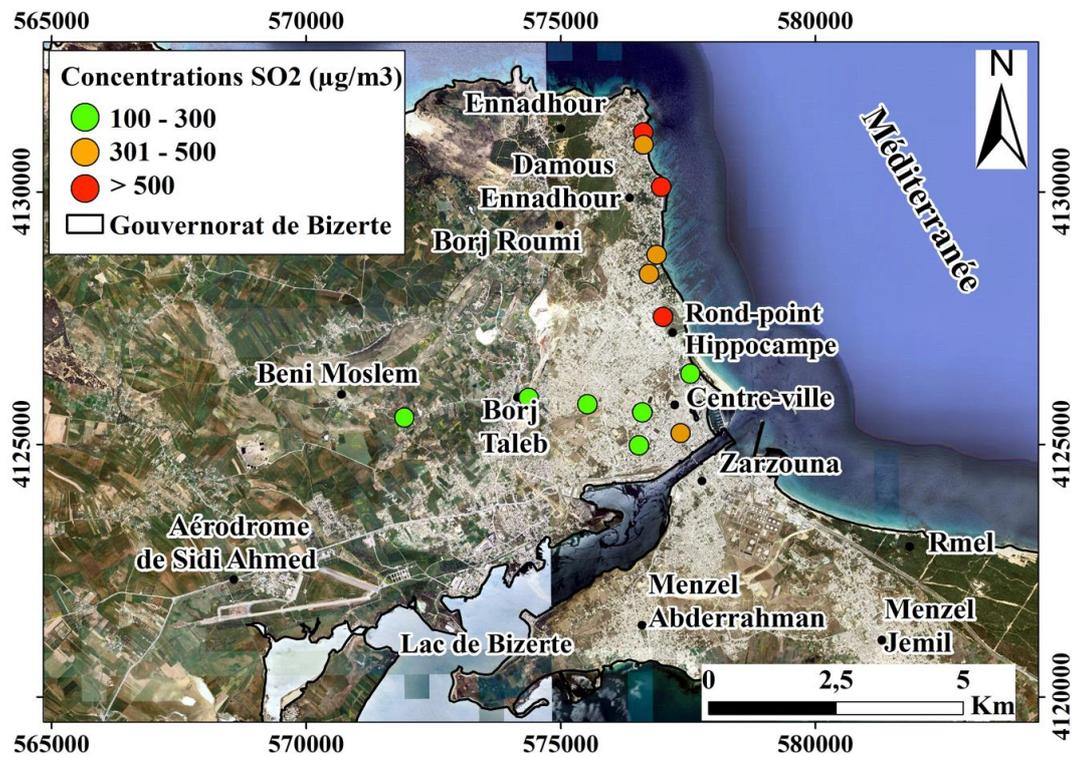
**Figure 6. 3. Carte des concentrations de dioxyde de soufre dans l'agglomération de Bizerte (Matin)**

(Données des mesures semi-itinérantes du 15-21/08/2021 de 8h à 8h30)



**Figure 6. 4. Carte des concentrations de dioxyde de soufre dans l'agglomération de Bizerte (Après-midi)**

(Données des mesures semi-itinérantes du 15-21/08/2021 de 17h à 17h30)



**Figure 6. 5. Carte des concentrations de dioxyde de soufre dans l'agglomération de Bizerte (Soir)**

(Données des mesures semi-itinérantes du 15-21/08/2021 de 21h00 à 21h30)

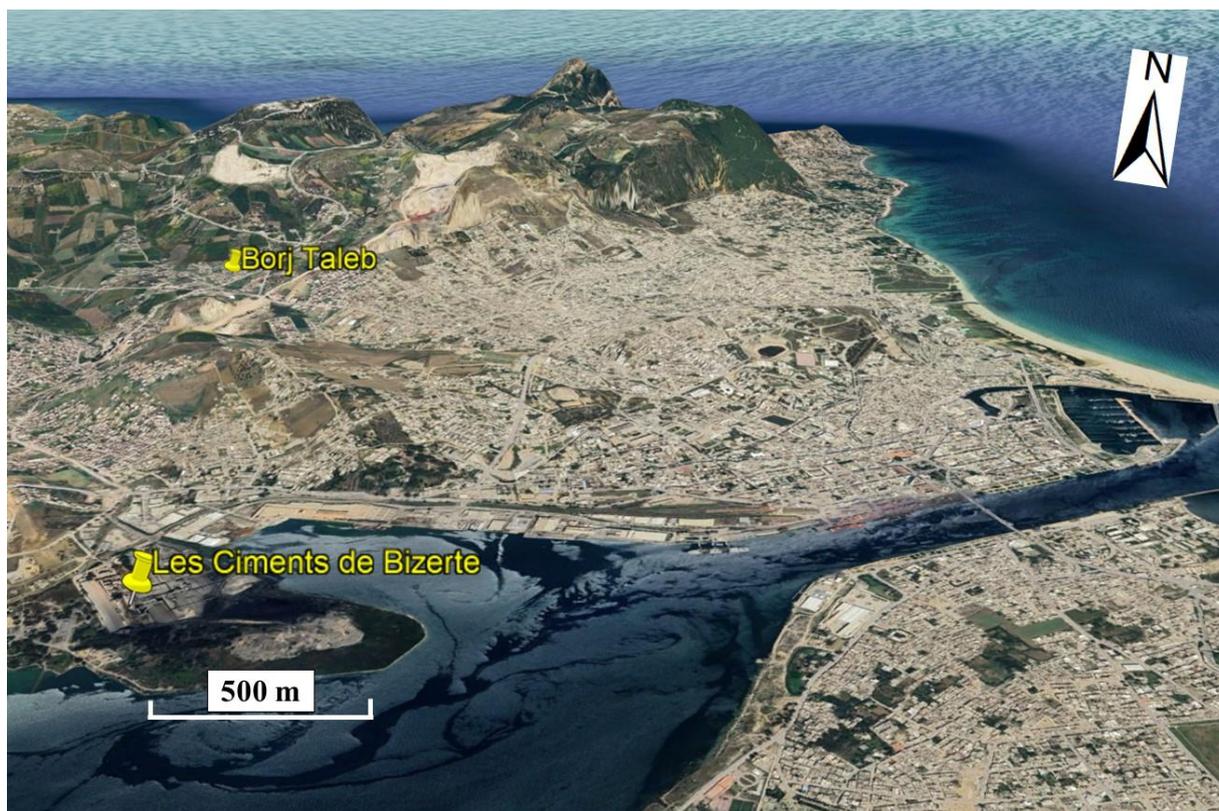
Les mesures de l'après-midi traduisent un changement net des concentrations de SO<sub>2</sub>. En effet, la fréquentation des zones urbanisées devient plus importante, notamment à Bizerte nord où on enregistre trois dépassements de la concentration 300 µg/m<sup>3</sup> et un cas de dépassement de 500 µg/m<sup>3</sup>. La fréquentation de ces endroits engendre une augmentation des dégagements des moyens de transport à combustion, y compris le SO<sub>2</sub>.

Aussi, sous l'effet des brises de mer du nord-est, les fortes concentrations qui étaient au nord sont acheminées vers le sud d'où la forte concentration sur Kayas El Jdid, notamment au niveau de la résidence du gouverneur de Bizerte.

Le soir, ces constatations se confirment. La voie qui mène du centre-ville vers la grotte en passant par la corniche enregistre pendant la période nocturne les plus fortes concentrations sous l'impact d'une fréquentation de plus en plus accentuée. Une fréquentation du milieu pour chercher la fraîcheur de la mer. Le 17/08/2021, lors des mesures nocturnes, on a enregistré au rond-point Hippocampes aux alentours de 40 voitures/mn comme donnée ponctuelle lors de l'observation). Sur le même site, le nombre de véhicules était de 20 voiture/mn le matin et 10 voitures/mn en début de l'après-midi. Aussi, cette densité observée des voitures lors des mesures nocturnes pendant l'été 2021 (21h00 à 21h30) dans une zone à caractère résidentiel comme Zeqaq-Ezzouz est causée par l'obligation de retourner chez soi imposée par les restrictions de circulation en relation à la pandémie COVID 19 (couvre-feu de 22h jusqu'à 5h du matin et ce à partir du 1<sup>er</sup> août 2021 et allégé de minuit à 5h du matin à partir du 19 août 2021).

Sur ce trajet, centre-ville vers la grotte, 6 points de mesures ont enregistré des concentrations dépassant 300 µg/m<sup>3</sup> et 3 points de mesures où la concentration en SO<sub>2</sub> a dépassé 500 µg/m<sup>3</sup>.

Il est à noter aussi que la configuration du site intervient pour influencer le niveau de concentration du SO<sub>2</sub> (et des autres polluants). La topographie et le vent contribuent à l'acheminement ou le blocage des polluants. Cette constatation est observée sur le site de Borj Taleb pendant une campagne de mesure en mai 2022. En effet, le 05/05/2022 pendant une mesure matinale, on a enregistré 400 µg/m<sup>3</sup>. Un vent du sud-est d'une vitesse de 5-6 m/s a acheminé la fumée contenant, entre-autres, le SO<sub>2</sub> vers Borj Taleb. La colline qui se trouve derrière le site du côté nord a contribué à bloquer cette pollution ce qui a engendré un taux élevé de concentration du SO<sub>2</sub> (Fig. 6.6).

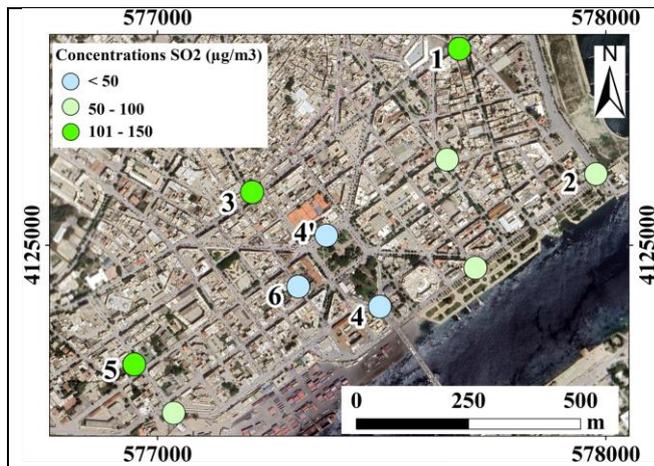


**Figure 6. 6. Position du site de Borj Taleb par rapport à la colline au nord-ouest, la cimenterie de Bizerte au sud-est et la mer à l'est**  
(Google Earth)

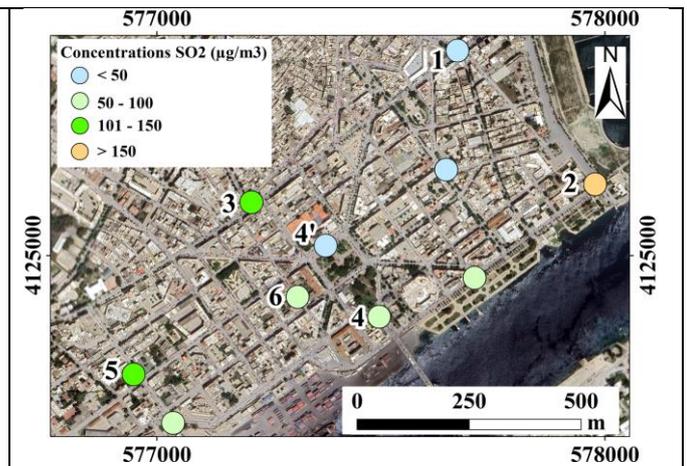
A une échelle plus fine au niveau du quartier européen, les analyses montrent des points noirs où la concentration en  $\text{SO}_2$  enregistre des valeurs importantes. Ce sont généralement des ronds-points ou des intersections importantes très fréquentés. Les fortes concentrations en  $\text{SO}_2$  persistent au niveau du rond-point de l'horloge (3) au cours de toutes les périodes de la journée (sauf pour les mesures nocturnes). Un comportement similaire est observé au niveau de l'école Jean Giono (5). Le point 1 près du vieux port du côté du restaurant-bateau « s'estompe » en début d'après-midi en faveur du point 2 près du rond-point du restaurant du sport nautique. Tous les deux sont très fréquentés, respectivement le matin et le début de l'après-midi, pour l'entrée ou la sortie du centre-ville vers la corniche. Entre le point 1 et le point 2, la situation s'inverse en fin d'après-midi.

Au niveau de la place Foch, il y a une grande différence entre son intersection du côté du pont (4) et celle du côté de la municipalité (4'). Le point 4, à part le début de la journée, enregistre toujours des concentrations en  $\text{SO}_2$  plus importantes que son image de l'autre côté de la place (4') (Fig. 6.7 à Fig. 6.10).

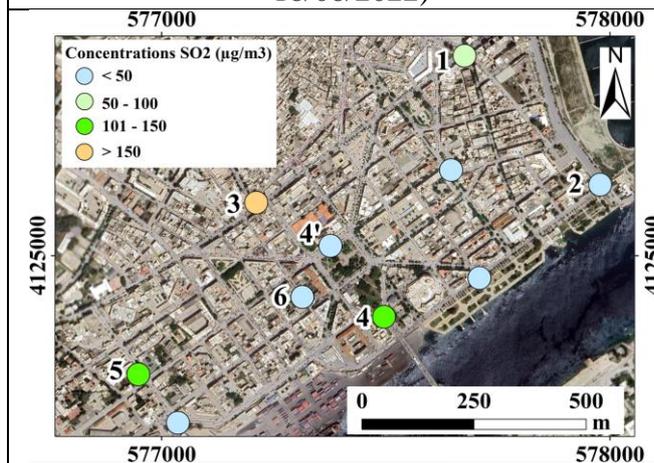
Ceci s'explique par le fait que les flux de véhicules empruntant cette intersection (4) soit en aller ou en retour Bizerte-Tunis (ou Bizerte sud du pont) est très important.



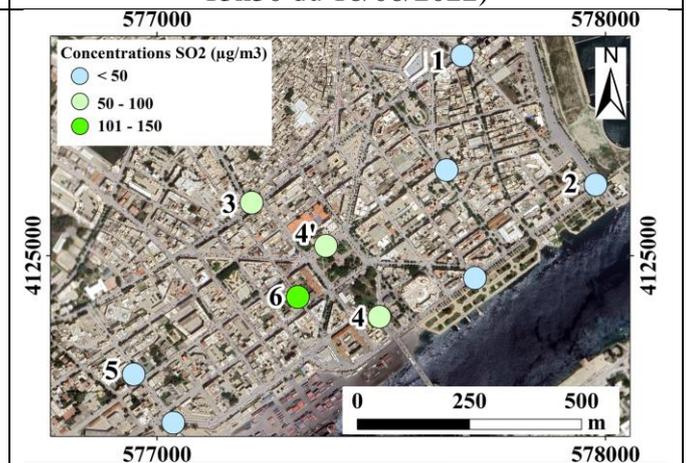
**Figure 6. 7. Répartition spatiale des concentrations SO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (matin)**  
(Mesures matinales de 07h45 à 08h15 du 18/08/2022)



**Figure 6. 8. Répartition spatiale des concentrations SO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (début de l'après-midi)**  
(Mesures en début de l'après-midi de 13h00 à 13h30 du 18/08/2022)

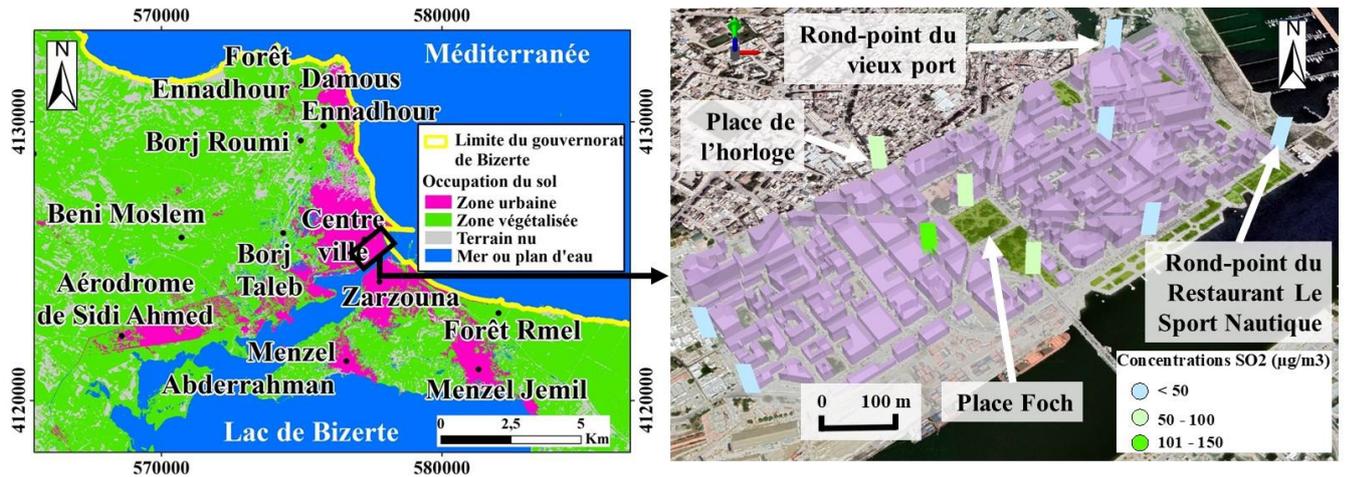


**Figure 6. 9. Répartition spatiale des concentrations SO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (fin de l'après-midi)**  
(Mesures de la fin d'après-midi de 18h00 à 18h30 du 18/08/2022)



**Figure 6. 10. Répartition spatiale des concentrations SO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (soir)**  
(Mesures nocturnes de 00h30 à 01h00 du 19/08/2022)

L'impact de la fréquentation du site apparaît comme ayant plus d'influence dans la définition de la concentration en SO<sub>2</sub> que l'effet de la brise de mer, surtout que sa vitesse ne dépasse pas 5-7 m/s. Au niveau du site 6 on ressent peu l'effet de la brise au profit de l'effet d'abri et d'encaissement avec un facteur de vue du ciel (FVC ou SVF en anglais) égal 0,28 ce qui veut dire un espace serré et encaissé. Ces constatations sont rendues plus faciles avec l'exploitation des ressources sur internet comme Google Street, mais aussi avec la maquette 3D du quartier européen qu'on a développé (Fig. 6.11).



**Figure 6. 11. Répartition spatiale des concentrations SO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte drapées sur sa maquette 3D**

(Mesures nocturnes à 00h30 du 19/08/2022 et travaux personnels de modélisation 3D)

## 2- Dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)

Etant donné que les données collectées par les capteurs installés en tant que stations fixes ou lors des mesures semi-itinérantes datent de 2021, 2022 et 2023, les seuils considérés seront ceux de l'OMS de 2021 (déclarés officiellement en septembre 2021) et non de 2005.

Aussi, étant donné que la fréquence d'enregistrement des concentrations de NO<sub>2</sub> est globalement d'une demi-heure, on va considérer la moyenne et le maximum horaire et calculer ainsi les moyennes sur 24 heures.

### 2.1- Variabilité temporelle du NO<sub>2</sub> :

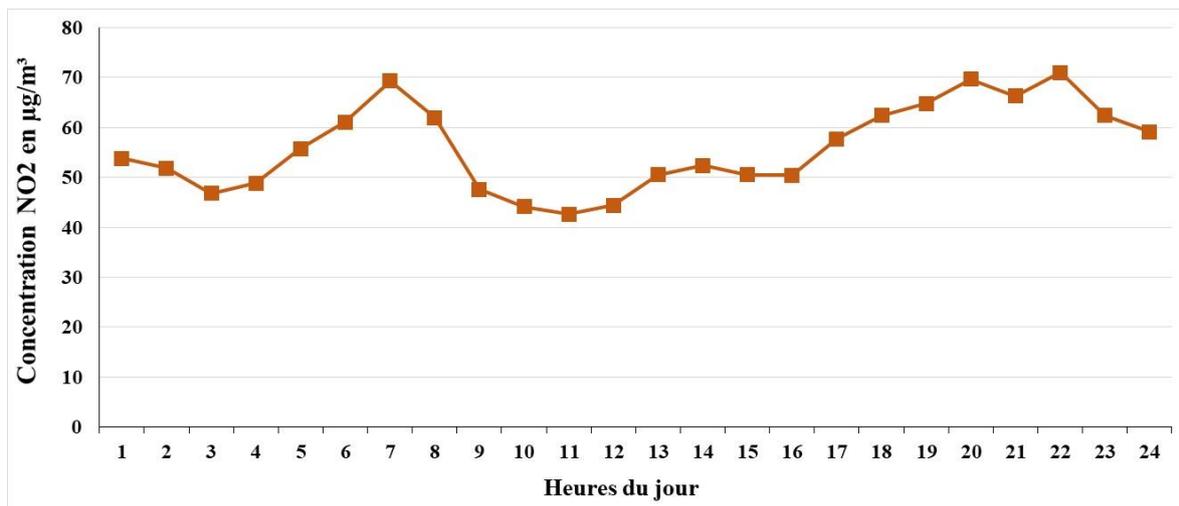
Au centre-ville, les données utilisées pour analyser la variabilité temporelle du NO<sub>2</sub> sont issues de différents capteurs installés durant les périodes suivantes :

- De 23/08/2021 à 07/09/2021
- De 26/03/2022 à 14/11/2022
- De 04/02/2023 à 29/08/2023

Une remarque générale qui s'applique sur toutes les échelles temporelles considérées est que les taux de concentrations de NO<sub>2</sub> enregistrent toujours des dépassements du seuil de la moyenne sur 24h de l'OMS qui est de 25 µg/m<sup>3</sup>. Aussi, les valeurs ponctuelles peuvent être très importantes sous l'impact des dégagements des moyens de transport et en fonction du site. En effet, le 15 août 2021 à 21h30 au niveau de l'hôtel Resort Bizerte, la concentration en NO<sub>2</sub> était de 840 µg/m<sup>3</sup>. Elle était de 780 µg/m<sup>3</sup> à Zeqaq-Ezzouz. Si ces concentrations persistent pendant quelques heures (chose qui peut être possible, théoriquement, en fonction du site et

du temps de mesure) ou augmente, elle dépasse même la valeur guide tunisienne pendant trois heures qui est de  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Il est à rappeler que la circulation pendant cette période est sous restrictions en relation avec la pandémie COVID 19.

Sur une échelle quotidienne, ces données montrent une similitude quasi-totale durant toute la journée avec deux légers pics relatifs aux pics du trafic routier au centre-ville (de 7h à 9h et de 14h à 18h) (Fig. 6.12).

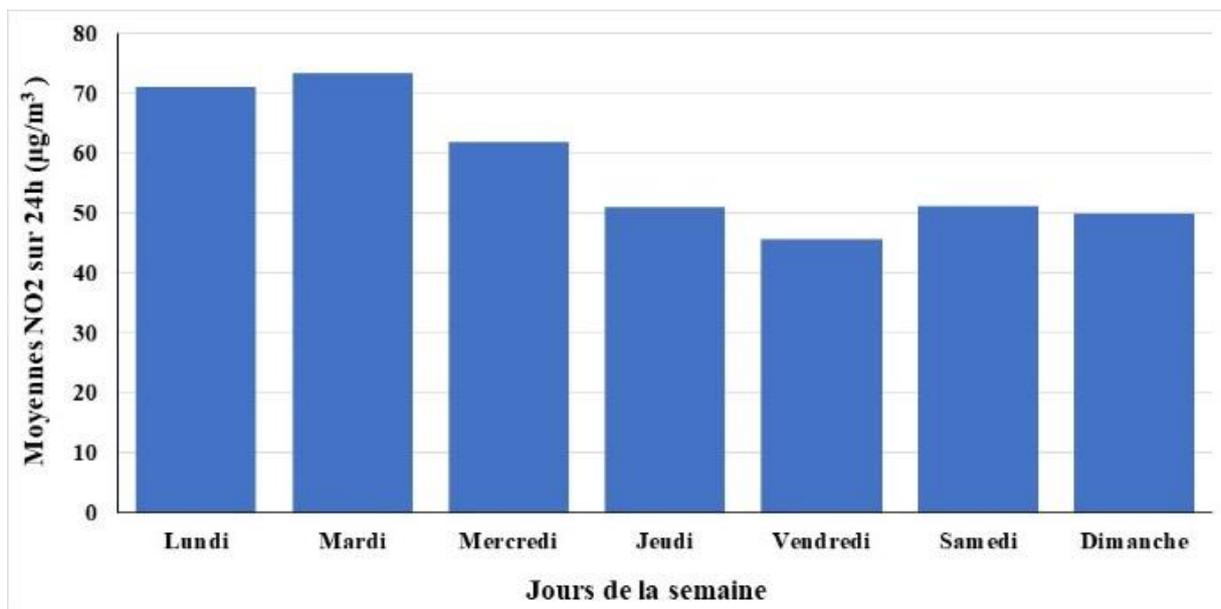


**Figure 6. 12. Répartition quotidienne des concentrations moyennes sur 24 heures du NO<sub>2</sub> au centre-ville de Bizerte**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> des périodes 23/08/2021 - 07/09/2021, 26/03/2022 - 14/11/2022, 04/02/2023 - 29/08/2023)

La variabilité est plus nette au niveau de la répartition hebdomadaire (Fig. 6.13) où le mardi s'individualise par les concentrations moyennes les plus importantes par rapport à un vendredi moins pollué. Cette constatation basée sur des moyennes ne doit pas estomper l'aspect temporel ponctuel de certains pics liés à des habitudes socio-économiques. Certaines de nos mesures sont faites juste après la prière du vendredi pour voir l'impact d'une hausse spontanée dans le nombre de véhicules utilisés. L'observation nous laisse dire que même si le nombre des véhicules et leurs natures influence instantanément les concentrations de NO<sub>2</sub> captées, c'est la disposition du site de mesure qui joue le rôle le plus important et ce par rapport à l'architecture de la ville et du quartier (exposé ou abrité à la pollution in-situ ou acheminée), mais aussi par rapport à la direction et la vitesse du vent.

Les valeurs les plus importantes enregistrées au début de la semaine sont liées à la grande fréquentation du centre-ville par les moyens locaux de transport à combustion, mais aussi en provenance de Tunis.

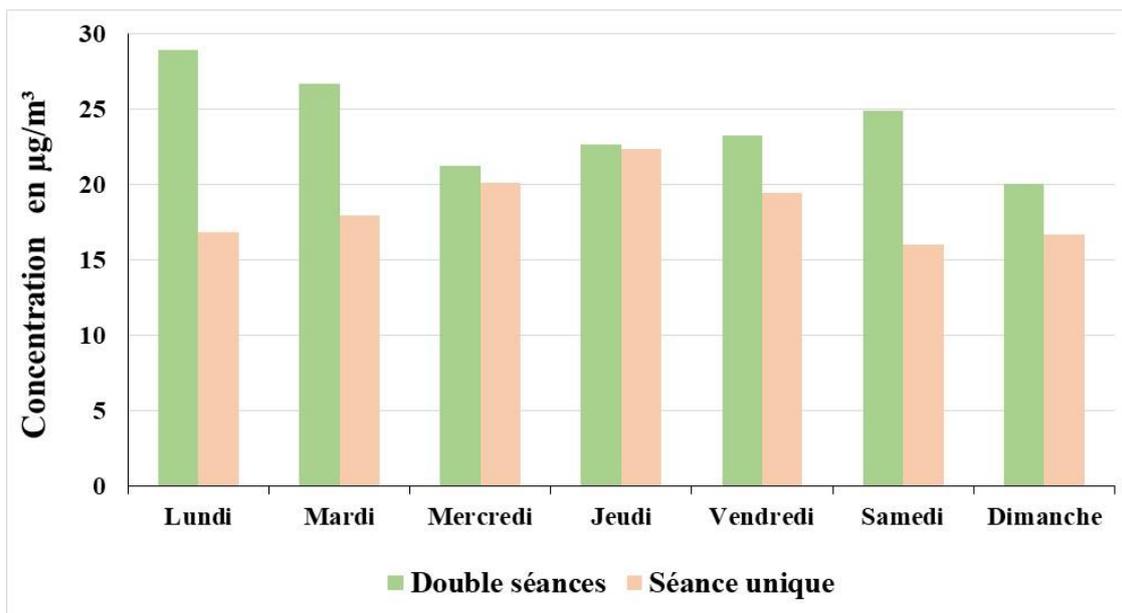


**Figure 6. 13. Répartition hebdomadaire des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> au centre-ville de Bizerte**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> des périodes 23/08/2021 - 07/09/2021, 26/03/2022 - 14/11/2022, 04/02/2023 - 29/08/2023)

Ces moyennes calculées sur différentes périodes peuvent estomper les caractéristiques différentes de certaines périodes de l'année. En effet, les observations faites sur les données de la saison estivale de l'année 2023 révèlent des répartitions à profils différents.

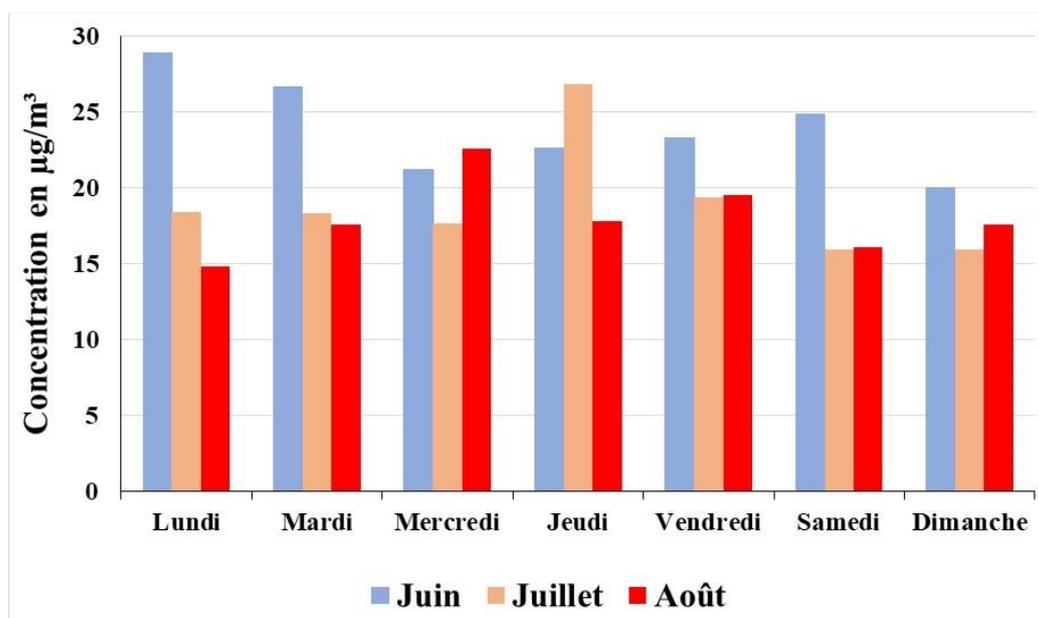
L'observation globale est que les concentrations en NO<sub>2</sub> sont généralement plus importantes au centre-ville durant le régime de travail à double séances (mois de juin) que celui de la séance unique (mois de juillet et août). Ceci est remarqué sur toutes les échelles temporelles, notamment celle hebdomadaire. Dans ce cas, ce n'est qu'au milieu de la semaine (jeudi surtout) que les écarts des concentrations en NO<sub>2</sub> entre les deux régimes de travail sont les plus faibles où on passe d'un écart de 12 µg/m<sup>3</sup> pour le lundi à 0,28 µg/m<sup>3</sup> pour le jeudi (Fig. 6. 14). Le degré de fréquentation du centre-ville par le trafic routier, source principale du NO<sub>2</sub>, étant plus important pendant le régime à double-séances en est la cause principale.



**Figure 6. 14. Répartition hebdomadaire des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par régime de travail au centre-ville de Bizerte**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)

A une échelle hebdomadaire, lorsqu'on compare les données par mois, c'est le mois de juin qui l'emporte sauf pour mercredi avec un léger devancement pour le mois d'août. C'est pendant les jeudis qu'on enregistre une prise d'importance des concentrations en NO<sub>2</sub> pour le mois de juillet (Fig. 6.15). L'effet week-end apparaît aussi à ce niveau où les concentrations en NO<sub>2</sub> sont plus faibles pendant les mois de juillet et août (à séance unique).

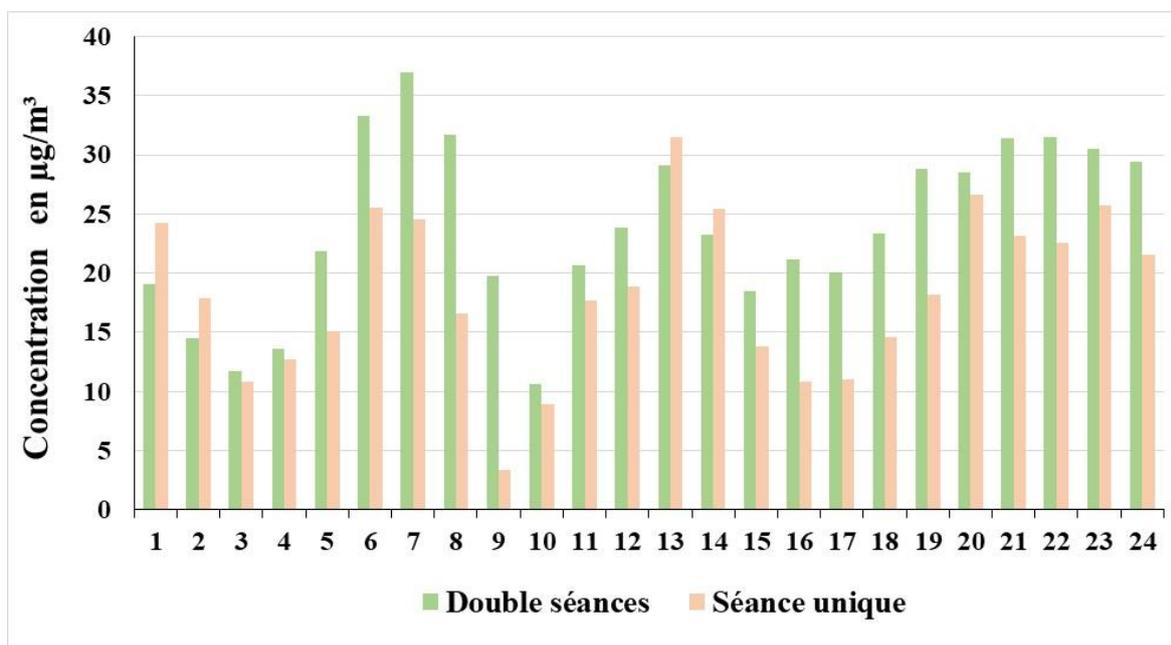


**Figure 6. 15. Répartition hebdomadaire des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par mois au centre-ville de Bizerte**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)

A une échelle quotidienne, les pics en NO<sub>2</sub> sont synchronisés avec :

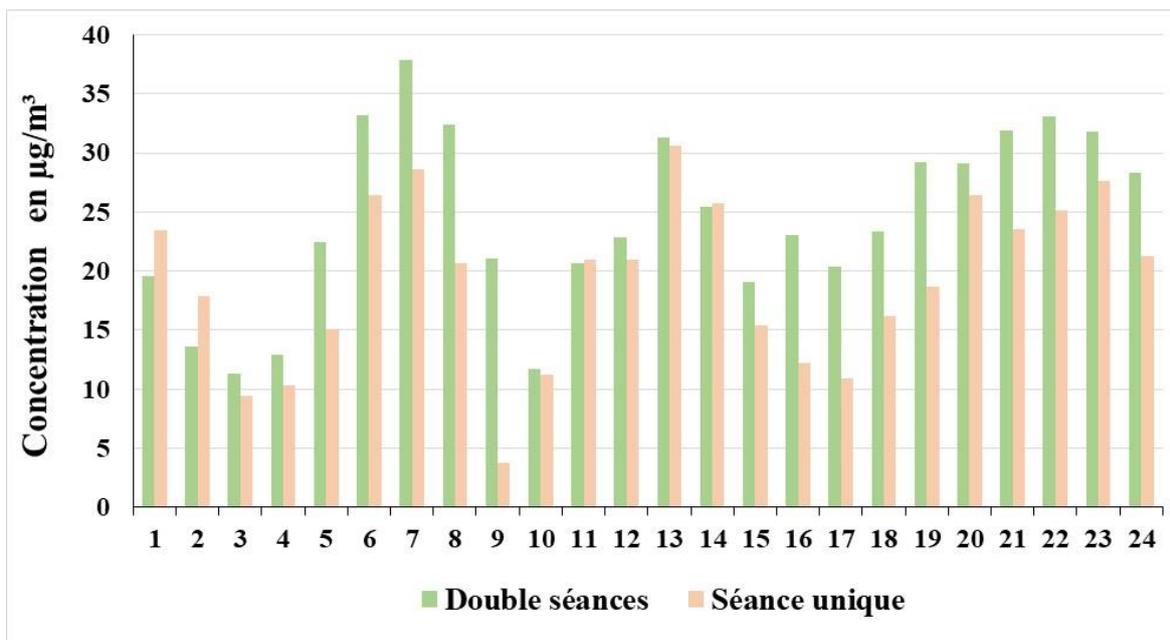
- Les sorties au travail entre 6h-8h du matin, notamment avec le régime de la double séance où les moyennes du NO<sub>2</sub> atteignent 37 µg/m<sup>3</sup>
- Les sorties du travail vers 13h, notamment avec le régime de la séance unique où les concentrations moyennes en NO<sub>2</sub> atteignent 31,5 µg/m<sup>3</sup>
- Les sorties nocturnes entre 21h-minuit
- Un pic moins important (21-23 µg/m<sup>3</sup>) est observé lors des sorties du travail entre 16h-18h avec le régime de la double-séance (Fig. 6.16)



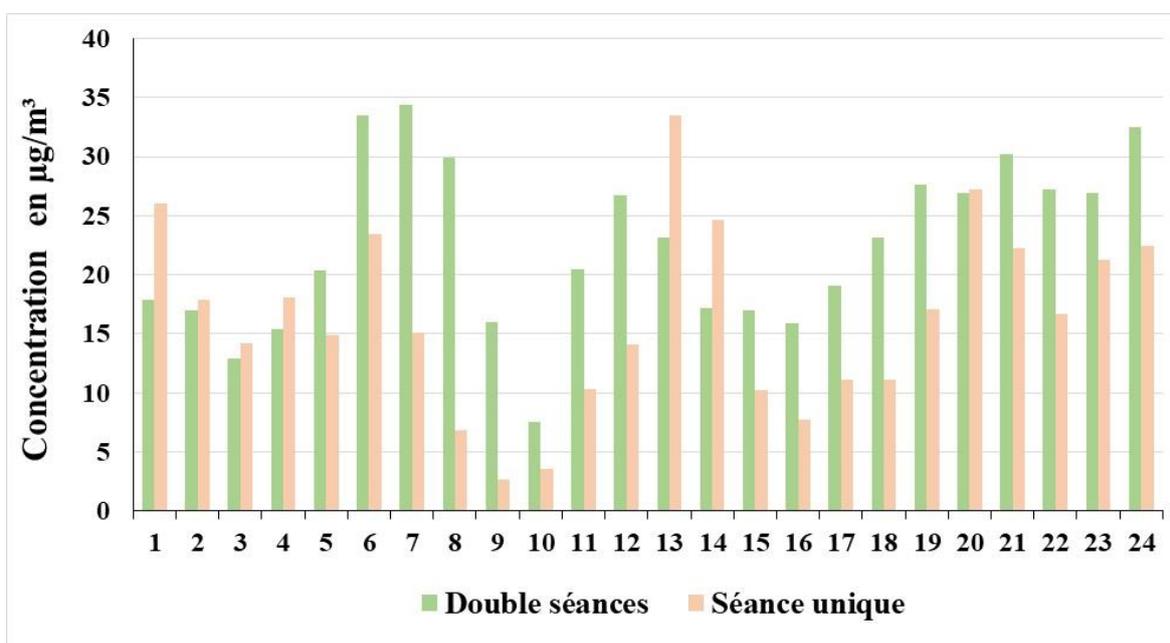
**Figure 6. 16. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par régime de travail au centre-ville de Bizerte**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)

On retrouve ces pics tout au long de la semaine. Ils sont légèrement moins importants pendant les samedis et dimanches (Fig. 6.17 et Fig. 6.18).



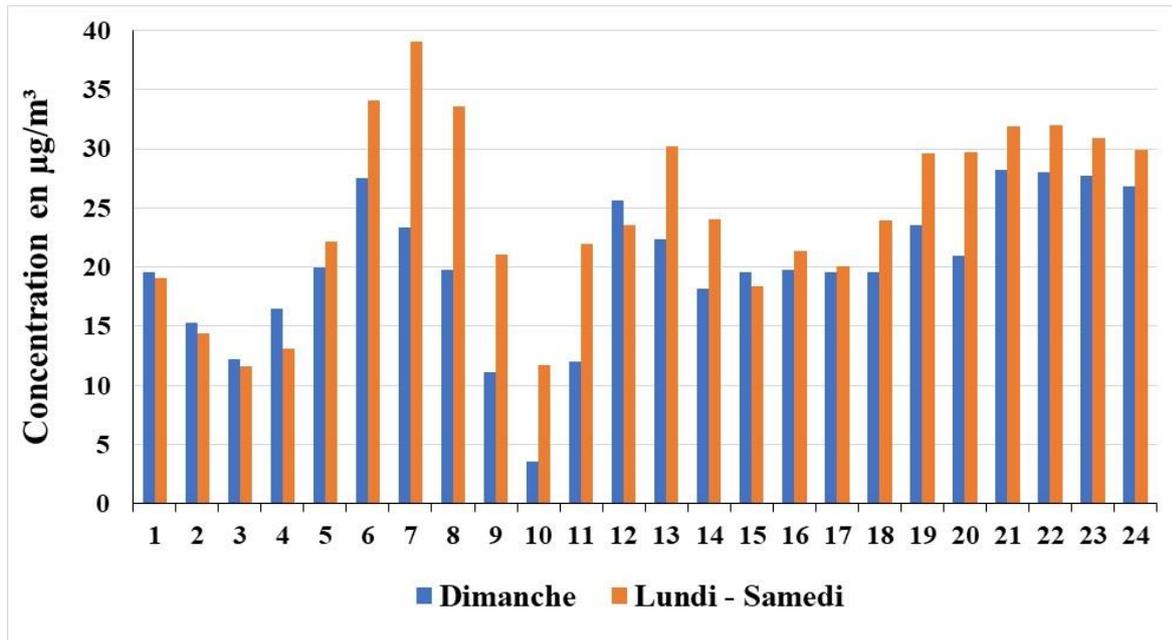
**Figure 6. 17. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par régime de travail du lundi au vendredi au centre-ville de Bizerte**  
(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)



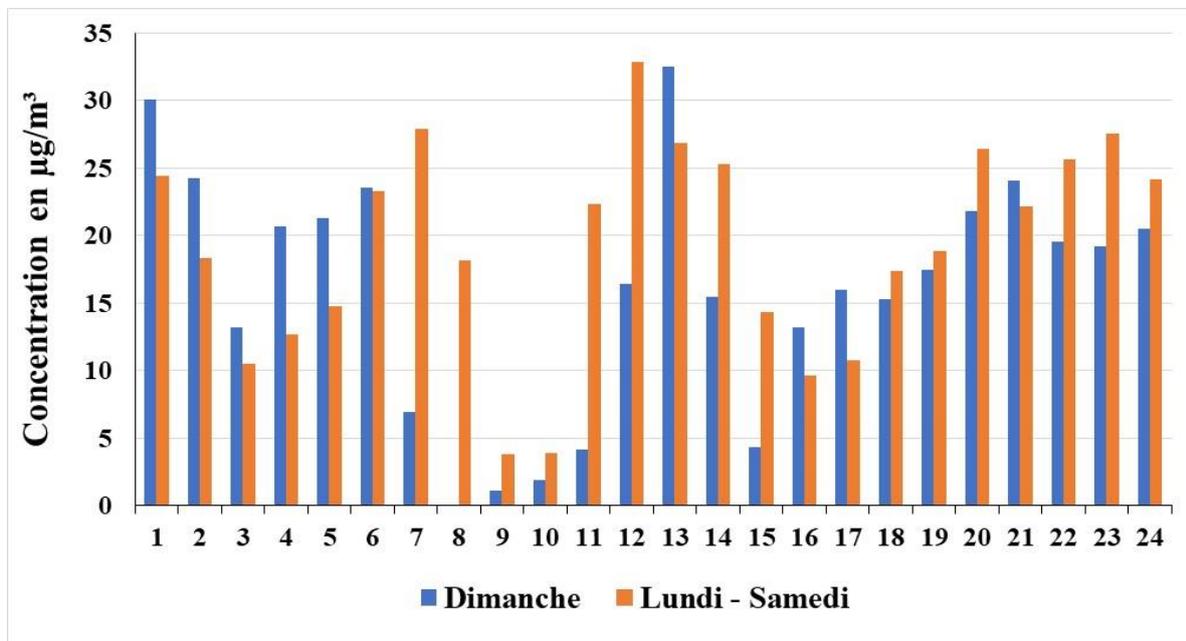
**Figure 6. 18. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par régime de travail pendant le week-end au centre-ville de Bizerte**  
(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)

Des analyses plus poussées nous ont permis de constater que progressivement les concentrations en NO<sub>2</sub> deviennent plus importantes pendant les dimanches et ce en allant de juin à août. Les pics atteints les dimanches à 13h et à 20h pendant le mois d'août représentent

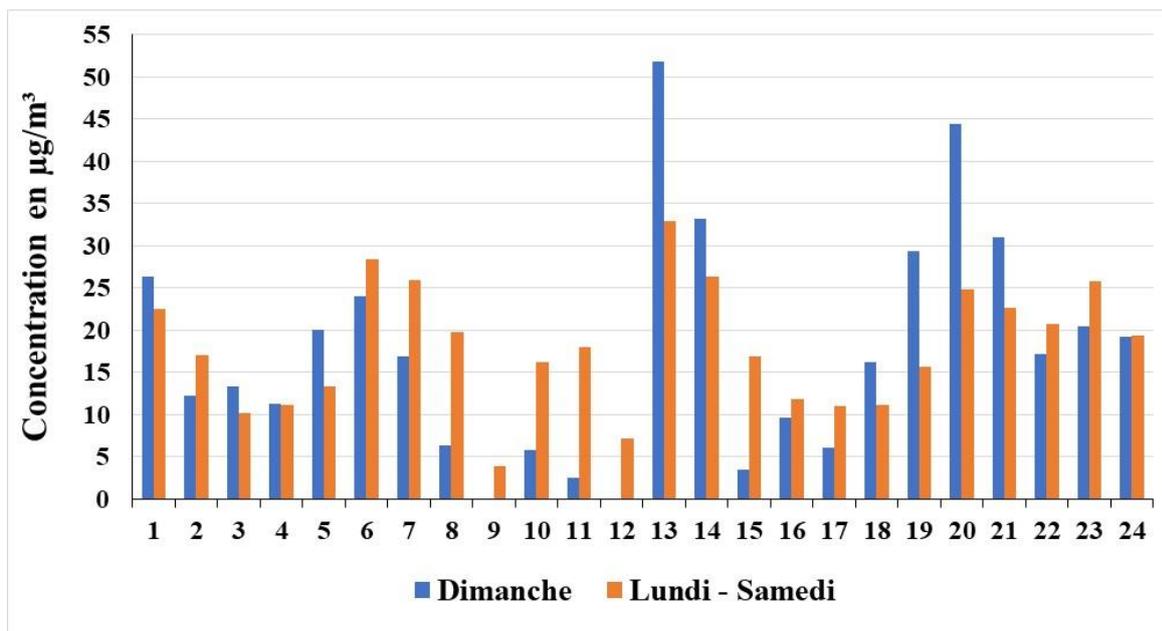
presque le double des concentrations atteints pendant les mois de juin et juillet (Fig. 6.19 – Fig. 6.21).



**Figure 6. 19. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par jour de travail / congé pendant le mois de juin au centre-ville de Bizerte**  
(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)



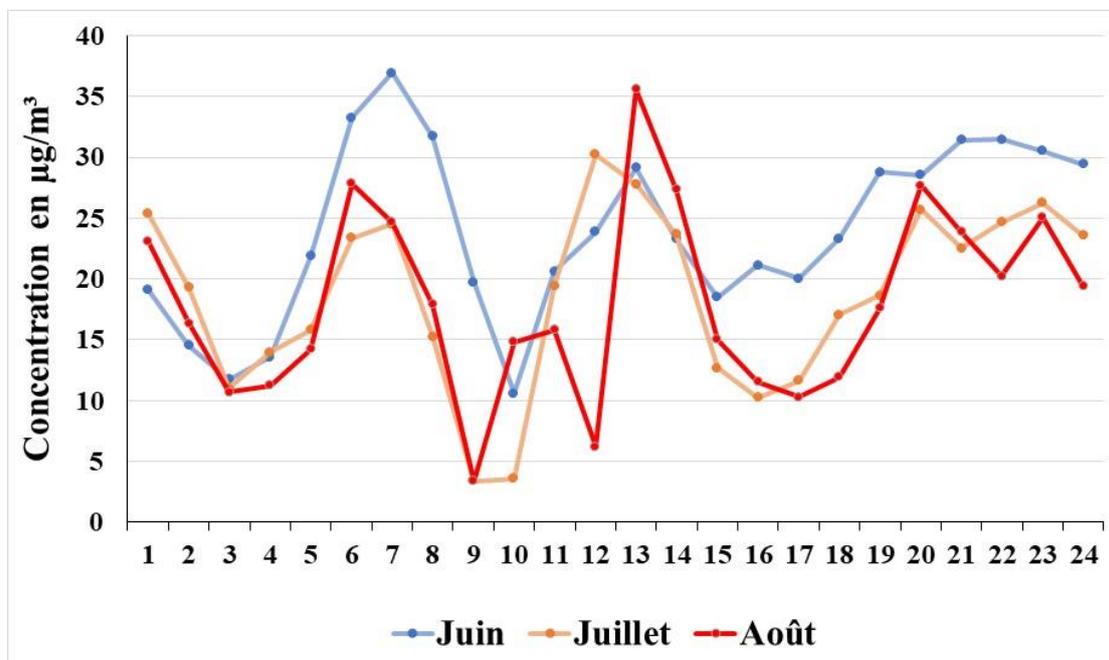
**Figure 6. 20. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par jour de travail / congé pendant le mois de juillet au centre-ville de Bizerte**  
(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)



**Figure 6. 21. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par jour de travail / congé pendant le mois d’août au centre-ville de Bizerte**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)

Comparé mois par mois et à une échelle quotidienne, c’est pendant le mois de juin qu’on enregistre les concentrations les plus importantes (avec un pic matinal de 37 µg/m<sup>3</sup>) à l’exception du milieu de la journée où on enregistre le pic vers 12h (30 µg/m<sup>3</sup>) pendant le mois de juillet et vers 13h pendant le mois d’août (35 µg/m<sup>3</sup>) (Fig. 6.22).

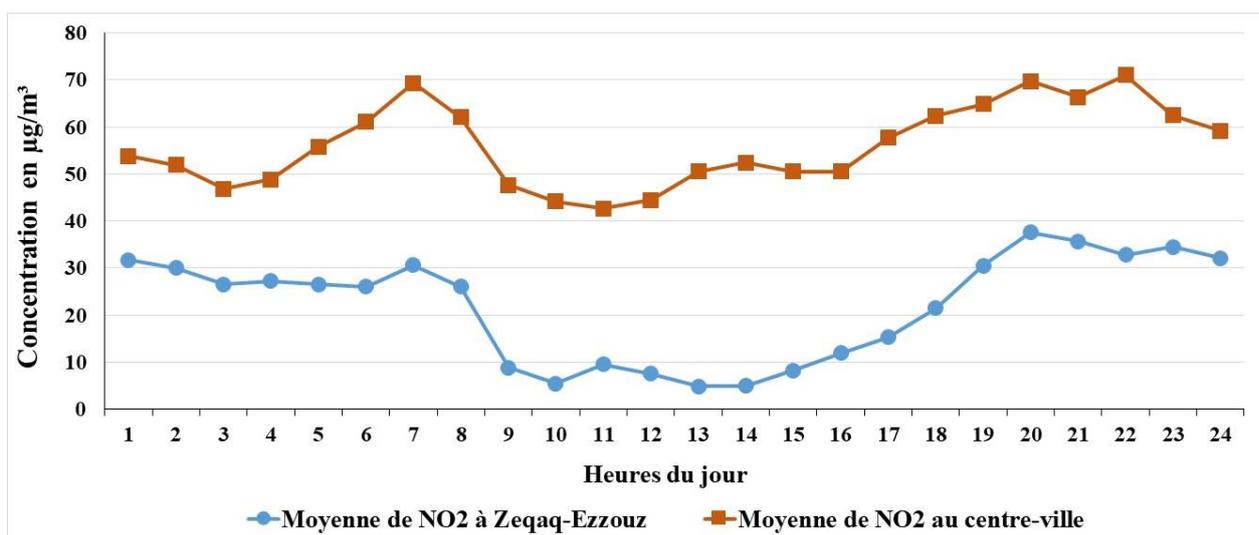


**Figure 6. 22. Répartition quotidienne des concentrations moyennes du NO<sub>2</sub> par mois au centre-ville de Bizerte**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 01/06/2023 - 29/08/2023)

À Zeqaq-Ezzouz, les données utilisées pour analyser la variabilité temporelle du NO<sub>2</sub> sont celles de l'année 2021 couvrant la période du 23/08/2021 à 07/09/2021 (c'est la période commune entre les capteurs installés au centre-ville et à Zeqaqa-Ezzouz). Inversement au centre-ville, les pics des concentrations de NO<sub>2</sub> enregistrés au début de la journée et tard à sa fin correspondent aux périodes de la journée où l'utilisation des moyens de transport à combustion (essentiellement les voitures) est la plus importante. En fait, de par son caractère résidentiel, Zeqaq-Ezzouz est un lieu de départ pour le travail vers le centre-ville (ou les villes voisines) ou d'un lieu d'accueil aux horaires de fin de travail pour les résidents ou encore pour ceux qui cherche la fraîcheur grâce à sa position entre la forêt et la mer. Ce qui appuie cette constatation est le fait qu'au moment où à Zeqaq-Ezzouz, on enregistre les plus faibles concentrations en NO<sub>2</sub> (10-20 µg/m<sup>3</sup>), de 9h jusqu'à 17h, au centre-ville, les concentrations avoisinent les 50 µg/m<sup>3</sup> (Fig. 6.23). Ces faibles valeurs sont aussi le résultat d'un effet d'assainissement qu'exercent les brises de mer soit orientales, soit septentrionales sur les concentrations de NO<sub>2</sub> à Zeqaq-Ezzouz. Cette période de la journée correspond aussi, entre autres, à une faible activité humaine à Zeqaq-Ezzouz (la sieste de midi).

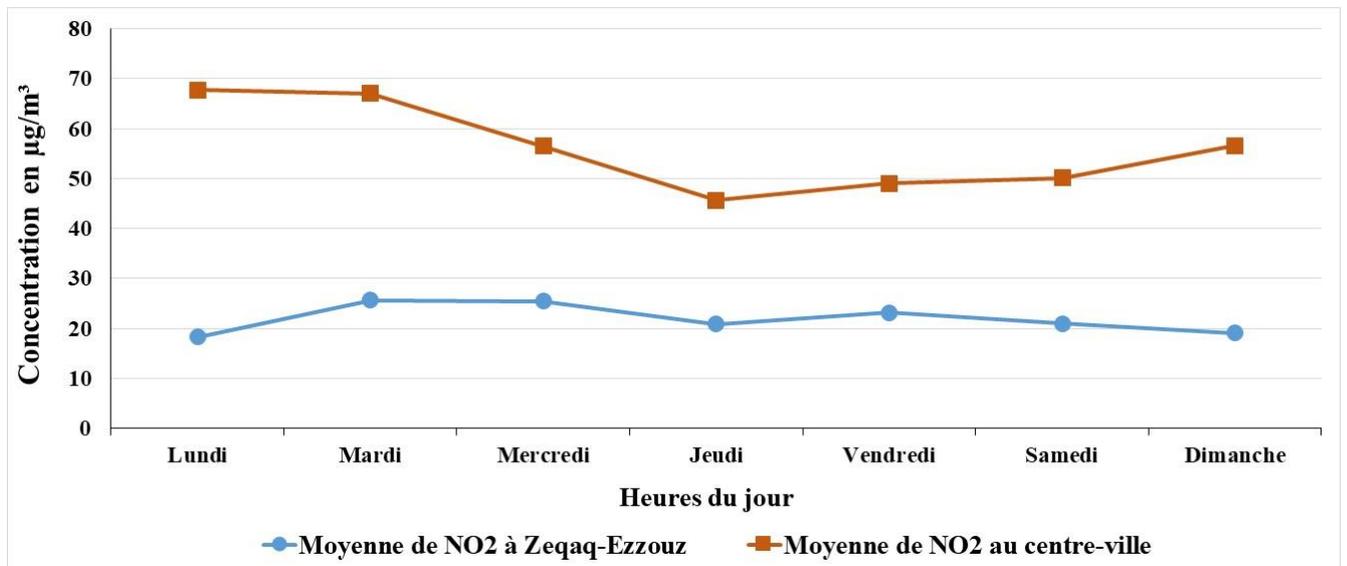
Cette période de mesure est caractérisée aussi par un type de temps où l'ambiance est plus fraîche à Bizerte et pendant laquelle aucune manifestation de sirocco n'a été enregistrée. Sur les 16 jours, 15 (à part le 04/09/2021) sont des jours de brises où la vitesse du vent oscille entre 2 et 5 m/s dont à 30% (des 16 jours de la période) souffle de la composante est.



**Figure 6. 23. Répartition quotidienne des concentrations moyennes sur 24 heures du NO<sub>2</sub> à Zeqaq-Ezzouz et au centre-ville**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 23/08/2021 à 07/09/2021, période commune de fonctionnement des capteurs entre les deux sites)

Sur une échelle hebdomadaire (Fig. 6.24), les concentrations en NO<sub>2</sub> reflètent la nature résidentielle de Zeqaq-Ezzouz. C'est au milieu de la semaine qu'on enregistre les plus faibles concentrations. L'effet « Week-end » apparaît inversement entre le centre-ville (concentrations plus faibles) et à Zeqaq-Ezzouz (concentrations plus importantes) où l'augmentation observée le samedi et le dimanche est liée à sa fréquentation pour le bien-être qu'offre ce quartier. Par rapport au centre-ville, l'écart en début de semaine, son milieu et sa fin est respectivement de 50 µg/m<sup>3</sup>, 27 µg/m<sup>3</sup> et 34 µg/m<sup>3</sup>.



**Figure 6. 24. Répartition hebdomadaire des concentrations moyennes sur 24 heures du NO<sub>2</sub> à Zeqaq-Ezzouz et au centre-ville**

(Données du capteur NO<sub>2</sub> de la période 23/08/2021 à 07/09/2021)

## 2.2- Variabilité spatiale du NO<sub>2</sub> :

Suivant l'échelle considérée, les caractéristiques de l'environnement des points d'observations seront utilisées comme variables explicatives du phénomène en l'absence d'autocorrélation spatiale (Martin et Adnès, 2014). L'analyse des cartes générées à partir des différentes campagnes de mesures semi-itinérantes se fera à deux niveaux : celui de l'agglomération et celui du quartier européen.

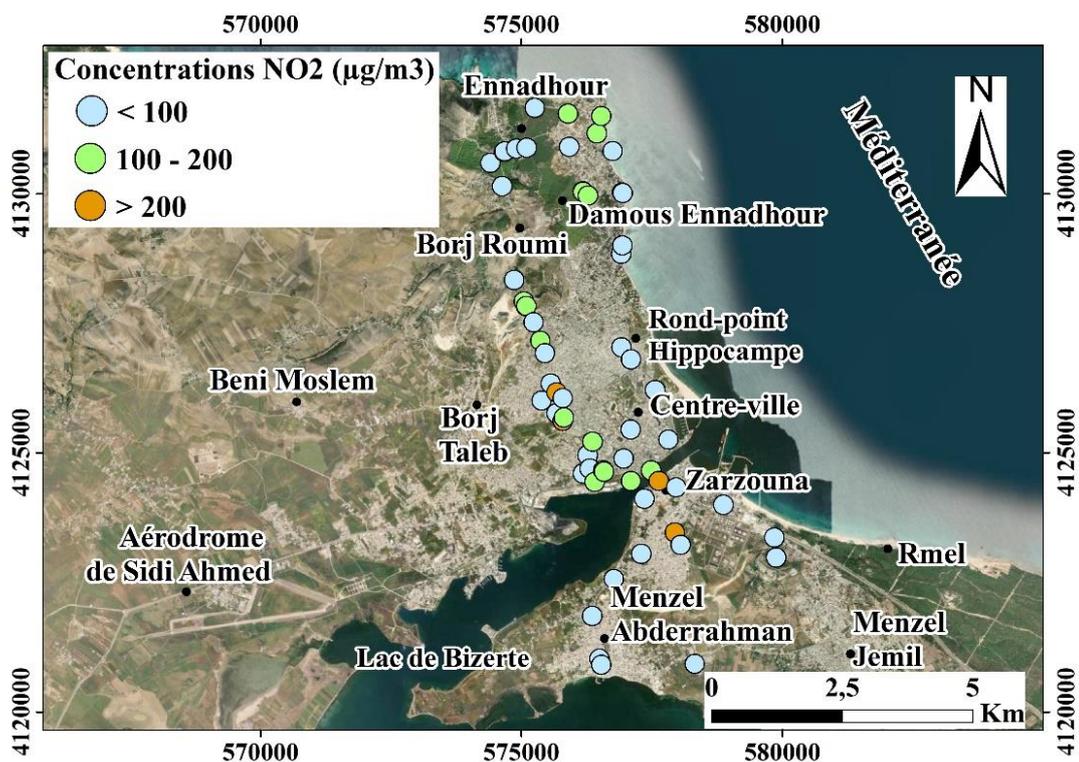
Aussi, nous avons choisi d'analyser séparément chaque période de la journée et ce afin de mieux cerner l'impact des paramètres météorologiques, environnementaux et socio-économiques sur les niveaux de concentration du dioxyde d'azote.

Sur les cartes suivantes (Fig. 6.25 à Fig. 6.27) apparaît plus l'impact des sources de pollution et des conditions topographiques. Néanmoins, la combinaison avec les paramètres météorologiques servira comme éléments d'explication et d'appui aux analyses.

En effet, dès le matin trois noyaux de concentrations importantes de NO<sub>2</sub> sont identifiés :

- Un noyau au nord-ouest du site du STIR s'expliquant essentiellement par les dégagements de l'usine (entre autres les NO<sub>x</sub>).
- Le pont mobile de Bizerte : un lieu fortement fréquenté le matin parce qu'il représente le seul moyen qui permet un déplacement direct entre Bizerte et Tunis.
- Le noyau d'Oued Marj un lieu de passage entre Bizerte du centre-ville et Béni Moslem et à quelques 500 m au nord-est du cimetière des Martyrs.

Les trois noyaux se partagent le caractère de forte fréquentation par les moyens de transport à combustion.



**Figure 6. 25. Carte des concentrations de dioxyde d'azote dans l'agglomération de Bizerte (matin)**

(Campagnes de mesures matinales en août 2021 et août 2022 de 07h30 à 08h00, 7 jours pour chaque campagne)

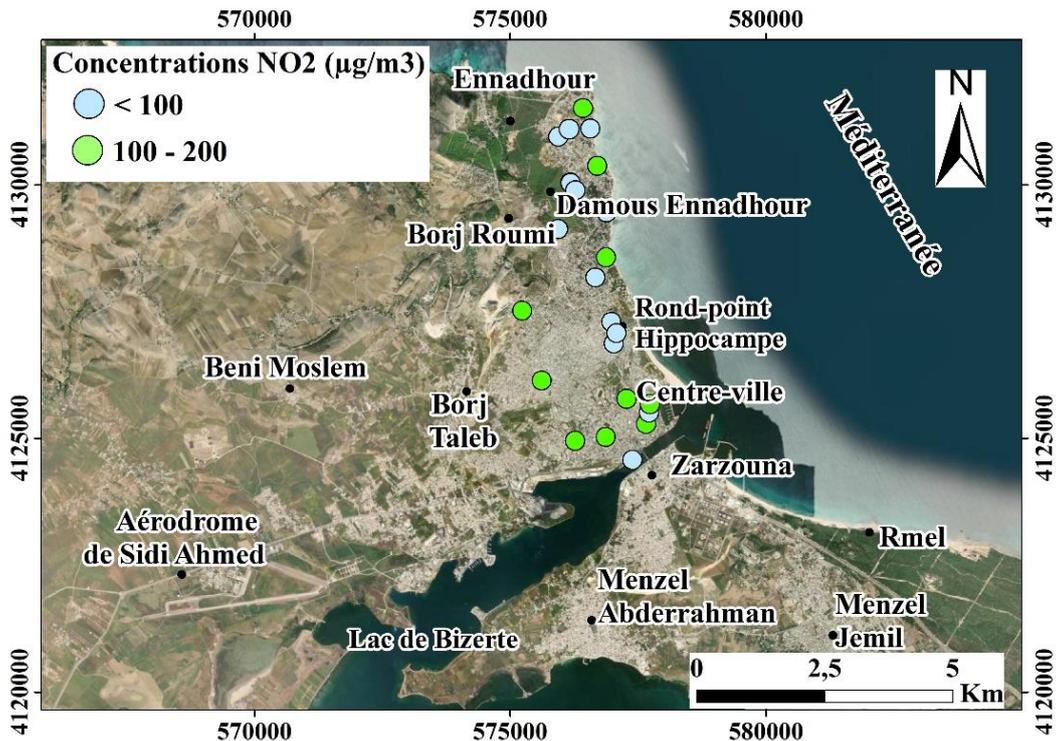


Figure 6. 26. Carte des concentrations de dioxyde d'azote dans l'agglomération de Bizerte (après-midi)

(Campagnes de mesures en après-midi en août 2021 et août 2022 (de 12h30 à 13h00))

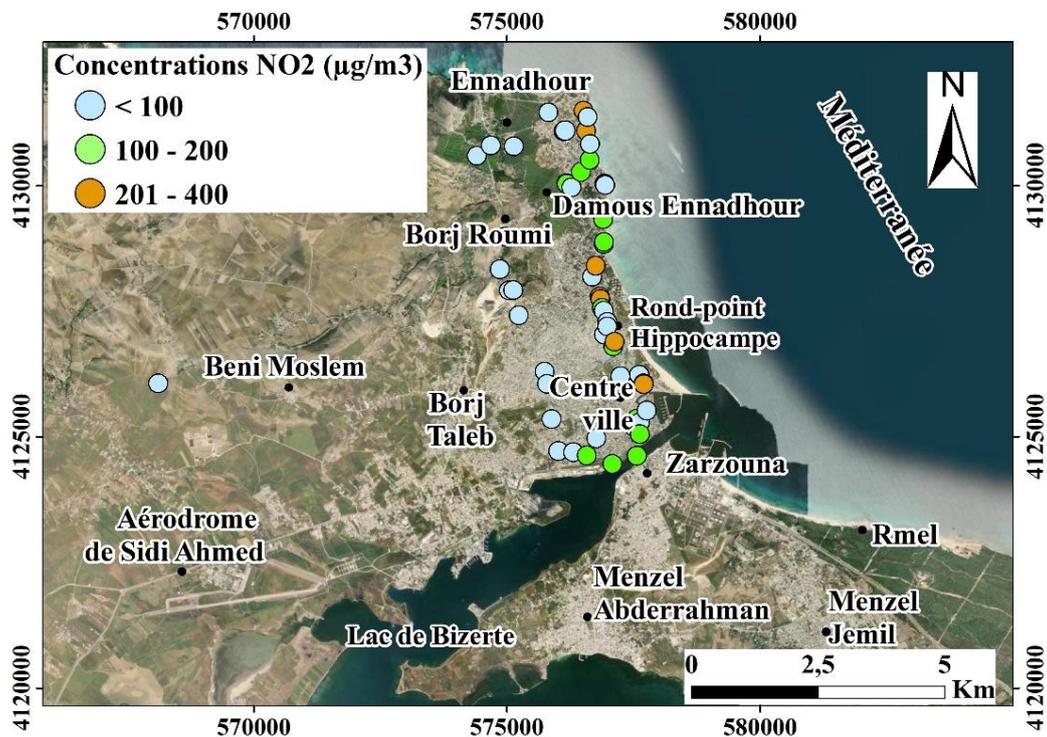


Figure 6. 27. Carte des concentrations de dioxyde d'azote dans l'agglomération de Bizerte (Soir)

(Campagnes de mesures nocturnes en août 2021 (de 21h00 à 21h30) et août 2022 (de 00h30 à 01h00))

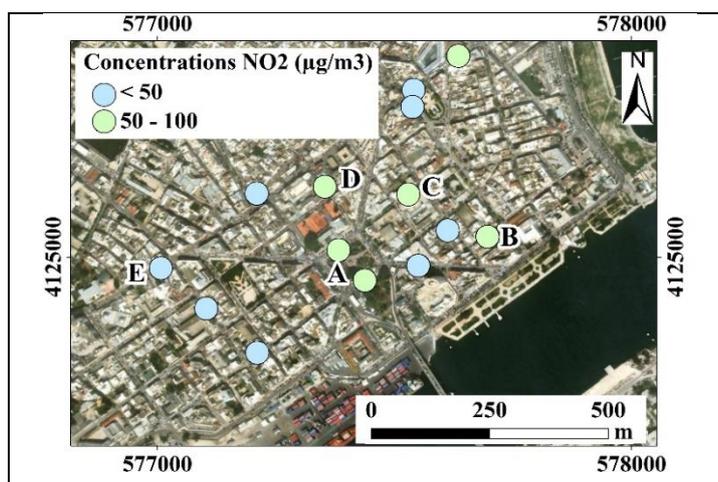
L'après-midi, étant donné l'effet d'attraction de ces trois noyaux diminue (peu de départ et d'arrivage), d'autres noyaux situés au nord de l'agglomération au niveau d'Ennadhour s'affichent. Le motif de fréquentation est la recherche de la fraîcheur.

Ce nouveau motif de fréquentation se confirme le soir avec l'apparition de nouveaux noyaux de concentrations élevées de NO<sub>2</sub> tout au long de la corniche.

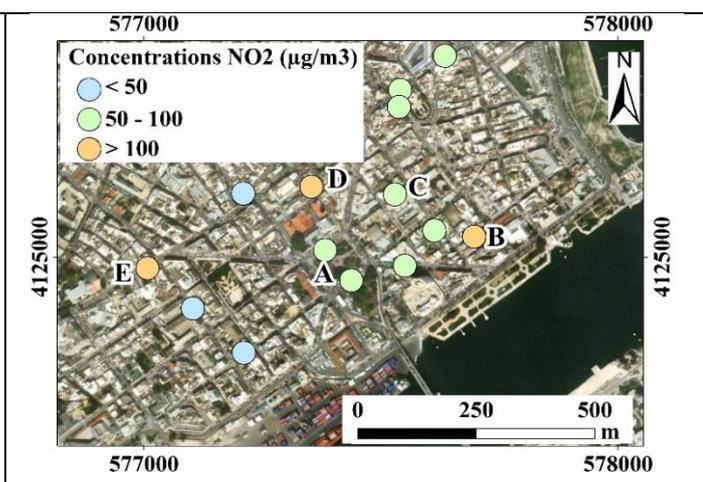
A un niveau plus fin, au sein du quartier européen, de nouveaux paramètres d'influence sur les concentrations du NO<sub>2</sub> apparaissent. Il s'agit essentiellement des caractéristiques du site : son encaissement, son degré d'ouverture sur le ciel (SVF), son exposition aux flux d'air (brises ou autre), sans pour autant que l'effet de fréquentation ne perd de son poids.

A titre d'exemple, le site de la place Foch (A) malgré qu'il soit très fréquenté puisqu'il représente le noyau de la ville, on y trouve des niveaux de concentration en NO<sub>2</sub> moins importants que d'autres points moins fréquentés (B, D et E) surtout en fin d'après-midi sachant que le site D est un site abrité de tout effet de brassage par les brises (Fig. 6.28 et Fig. 6.29).

Ceci est dû au fait qu'au moment des mesures en fin d'après-midi, à la place Foch, le nombre moyen des voitures en circulation (moteur en marche) peut atteindre les 20 voitures/minute et la vitesse du vent oscille entre 4 et 5 m/s. A la même période de la journée, au niveau du point D qui se trouve sur la rue 8 janvier en face de la Ligue Tunisienne des Droits de l'Homme, un site abrité de l'effet de brassage par la brise de mer, le nombre moyen des voitures est aux alentours de 13 et la vitesse du vent ne dépasse pas les 3 m/s (sauf au cas où une brise de mer canalisée par la rue Habib Bourguiba, garde sa vitesse et se trouve « obligée », sous l'effet des intersections, à faire des relâchements latéraux aux niveaux des rues en intersection ce qui conduit à une augmentation de sa vitesse (au niveau de ces rues).



**Figure 6. 28. Carte des concentrations de NO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (début de l'après-midi)**  
(Mesures de l'après-midi de 13h30 à 14h00)



**Figure 6. 29. Carte des concentrations de NO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte (fin de l'après-midi)**  
(Mesures en fin de l'après-midi de 17h30 à 18h00)

### 3- Les particules fines : PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>

Les PM<sub>2,5</sub> sont des particules dont le diamètre est de 2,5 microns (µm). Comme toutes les particules, elles sont constituées d'un mélange de différents composés chimiques. Elles sont émises principalement lors des phénomènes de combustion ou formées par réactions chimiques à partir de gaz précurseurs présents dans l'atmosphère.

La répartition des émissions des particules suivant leur taille varie selon les secteurs d'activités (DCCEEW, web ; Chiappini, 2009 ; Annesi-Maesano, 2019)

- Le trafic routier et le secteur résidentiel et tertiaire génèrent davantage de particules fines et très fines (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) liées au trafic routier (émissions issues de la combustion des carburants, abrasion des pneus)
- Les secteurs des chantiers et carrières génèrent plus de grosses particules (PM<sub>10</sub>), de par la nature de leurs activités (construction, déconstruction, utilisation d'engins spéciaux...)
- Le secteur de l'industrie manufacturière mêle souvent combustion et procédés divers, et produit des PM<sub>2,5</sub> et des PM<sub>10</sub>
- À cela s'ajoute les phénomènes de lithométéores

Les textes régissant les normes (NT 106.04) de pollution de l'air par les PM ont été modifiées en mai 2018, soit plus de vingt ans après son instauration. Trois décrets gouvernementaux considèrent désormais les PM<sub>2,5</sub> et aligne ses valeurs limites sur celles de l'OMS (CITET, Alertes n° 307, web).

L'agglomération de Bizerte comporte dans son tissu urbain et péri-urbain différentes sources de pollution par les PM. Dans ce qui suit, on va analyser la variabilité spatio-temporelle des PM.

Entre 2004 et 2016, le nombre de dépassements enregistrés par le capteur installé à Bizerte a atteint 212 cas (CITET, web, 2022).

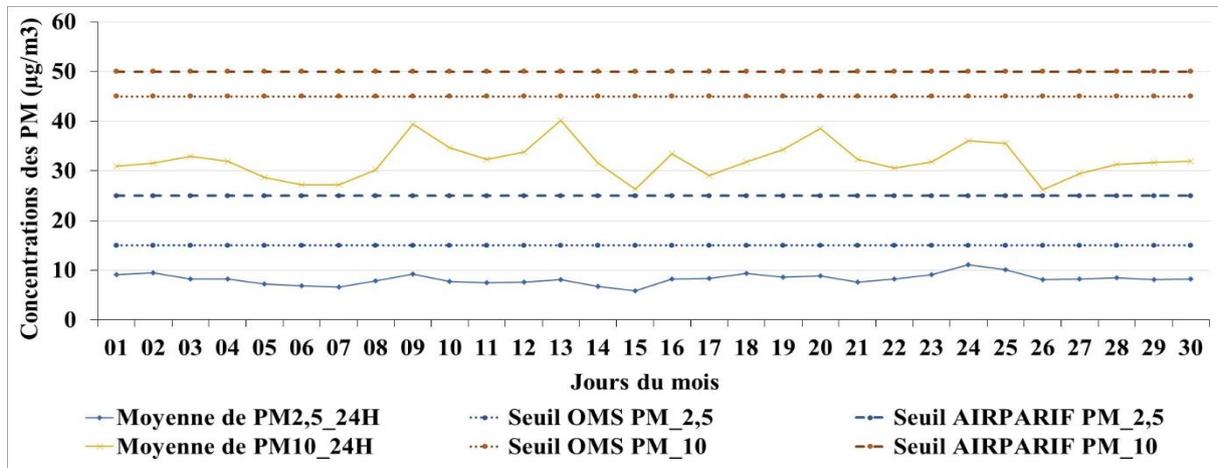
#### 3.1- Variabilité temporelle des PM :

Au centre-ville, les données utilisées pour analyser la variabilité temporelle des PM sont issues de différents capteurs installés durant les périodes suivantes :

- De 18/07/2022 à 31/05/2023
- De 01/06/2023 à 29/08/2023

A cause de l'aspect lacunaire des données des PM de l'année 2022 (11% seulement sont disponibles), on ne va considérer dans l'analyse que les données de 2023 (72% sont disponibles).

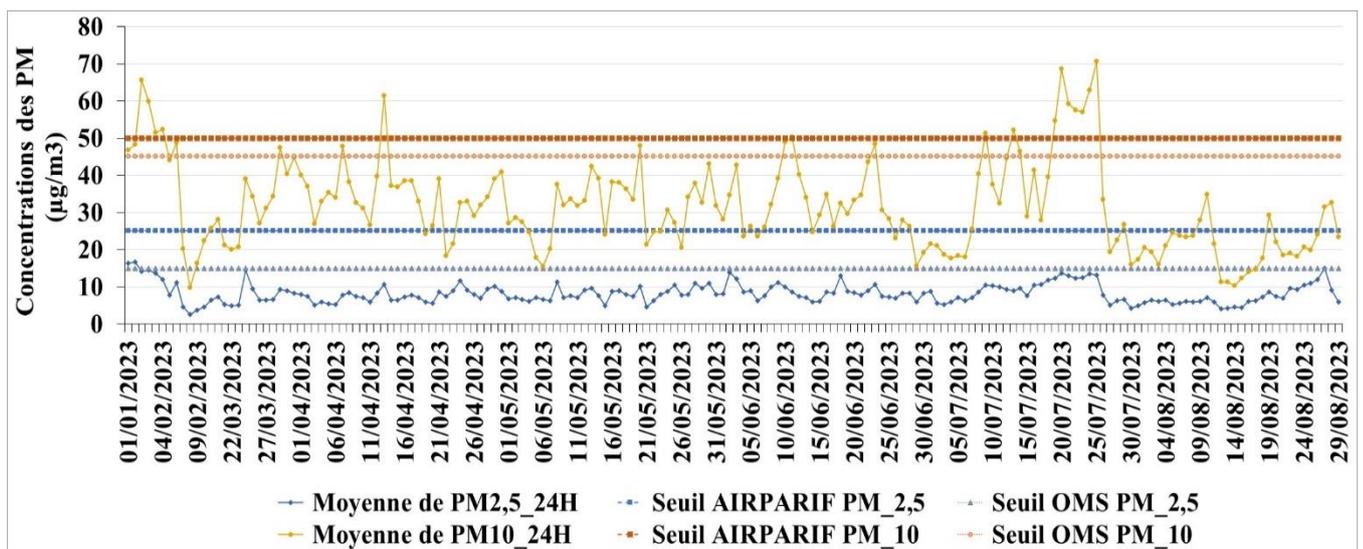
L'analyse des graphiques générés à partir des données du capteur PM installé au centre-ville de Bizerte montre que les concentrations en PM sur une échelle journalière sont globalement en dessous des seuils de l'OMS et d'AIRPARIF (Fig. 6.30).



**Figure 6. 30. Répartition des concentrations moyennes sur 24 heures des PM sur une échelle journalière**

(Données du capteur PM de la période du 01/01/2023 au 29/08/2023)

Les moyennes « globales » peuvent estomper les spécificités des dates pendant lesquelles on peut enregistrer des dépassements importants des seuils. Pour cette raison on a opté à générer des graphiques de toute la période du 01/01/2023 au 29/08/2023 pour avoir une vision globale, en premier lieu et puis détailler la période estivale de 2023 pendant laquelle va être évoquée la séquence de dépassements des seuils pour les PM<sub>10</sub> qui va durer 07 jours de suite et ce du 19-25 juillet 2023 (Fig. 6.31).



**Figure 6. 31. Répartition des concentrations des PM durant la période du 01/01/2023 au 29/08/2023**

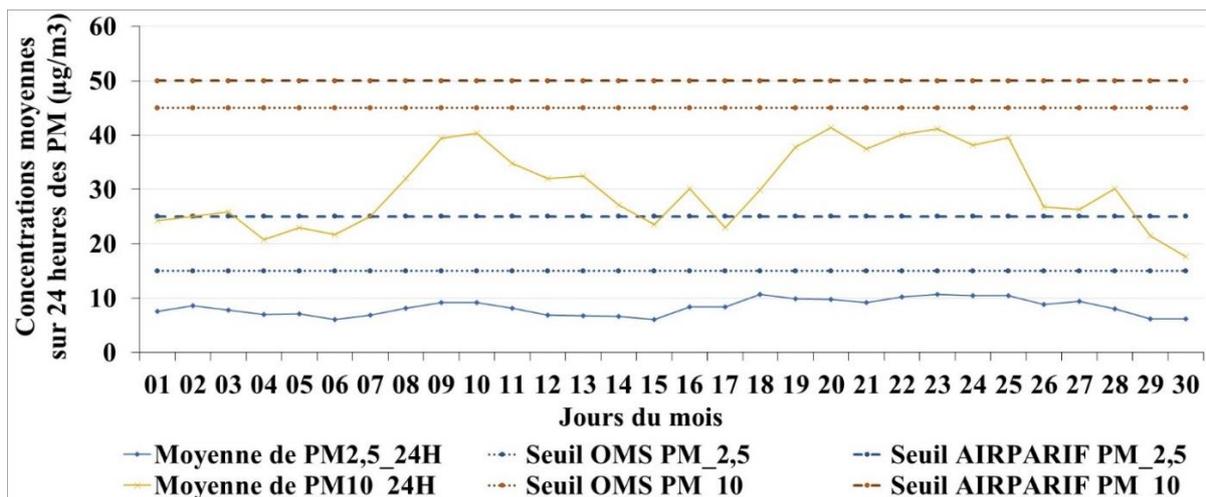
(Données du capteur PM de la période du 01/01/2023 au 29/08/2023)

Par mois et par jour, les données révèlent que les dépassements sont enregistrés pour PM<sub>2,5</sub> le 1<sup>er</sup> et le 2 janvier 2023. Pour PM<sub>10</sub>, les dépassements des seuils les plus importants sont enregistrés le 03 janvier 2023 et le 13 avril 2023. L'écart a atteint respectivement pour les deux dates, 15 µg/m<sup>3</sup> et 11 µg/m<sup>3</sup>. Les écarts les plus importants sont enregistrés pendant la période du 19 au 25 juillet 2023. Ils ont oscillé entre 4 µg/m<sup>3</sup> et 20 µg/m<sup>3</sup>.

Pour le 03 janvier 2023, le vent soufflait avec une vitesse moyenne de 1,5-2 m/s. Sa direction, telle que rapportée par INM-METAR balance entre 180°, 220° (de 11h à 15h) puis 310° et 360° (jusqu'à minuit). Pendant ce jour, on n'a pas trouvé des indices d'inversion ou de manifestation de sirocco (l'humidité relative minimale est de 42,57% ce qui exclut l'hypothèse de sirocco) expliquant cette hausse de pollution en PM. La hausse de température pendant ce jour (TMAX-Normale = 4,8°C) résulte d'une sorte de « goutte chaude » à 00 UTC (en altitude au niveau du géopotential 500 hPa) sur le nord-est et l'est de la Tunisie et le sud de l'Italie. Cette « goutte chaude » s'est transformée après 24 heures en marais barométrique en altitude et une dorsale ouest sud-ouest en surface. Cette situation, avec, fort probablement (parce qu'on n'a pas trouvé dans les observations une confirmation), la disponibilité des particules d'une source allogène ou locale a conduit à un remaniement sur place pour donner ces concentrations des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>.

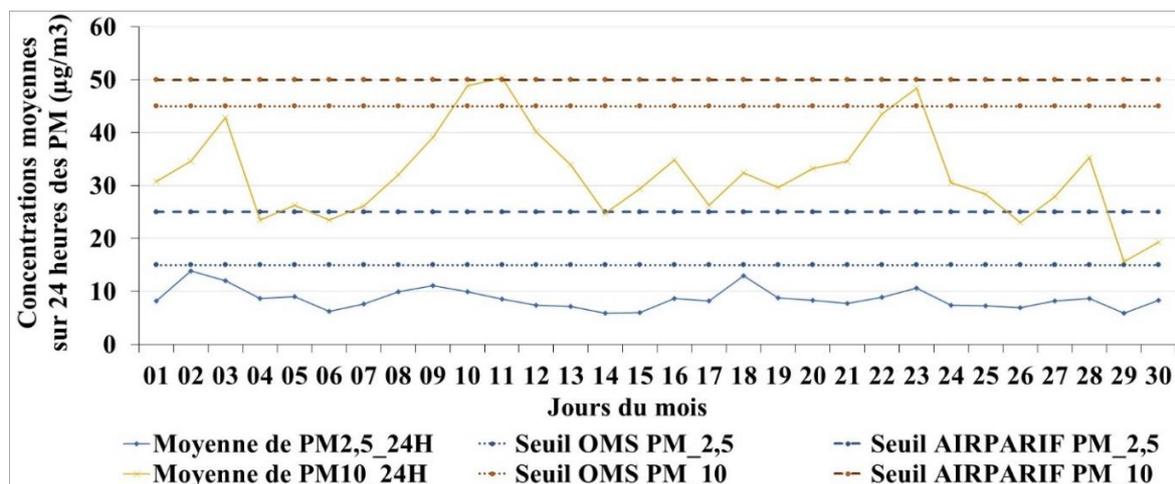
Pour les PM<sub>10</sub>, la journée du 13/04/2023 s'individualise par une hausse remarquable des taux de concentrations. A ce jour, en surface, la Tunisie est sous une influence combinée d'un talweg nord-est sud-est et d'une dorsale ouest-est envoyée par l'anticyclone des Açores. Selon les données de INM-METAR, le vent à 9 h était du sud sud-ouest (200°) et depuis 10 h jusqu'à minuit, il a basculé vers l'ouest et nord-ouest. Etant donné que l'humidité relative est supérieure à 40 %, cette journée ne correspond pas à du sirocco (humidité relative minimale est de 38,46%) et elle enregistre une anomalie thermique importante où TMAX-Normale = 3,7°C. A partir de 10h du matin et jusqu'à 19h, des rafales basculantes entre 14,8 m/s et 20,8 m/s ont soufflé sur Bizerte. Ces vents ont la capacité de transporter du matériel sur de longues distances.

Pour l'été 2023 (01 juin – 29 août 2023), on a 100% des données disponibles. Les concentrations moyennes sur 24 heures calculées sur une échelle journalière (Fig. 6.32) avec les données enregistrées par le capteur installé au centre-ville ne font pas apparaître de dépassement des seuils. Par mois, c'est au cours du mois de juin 2023 (Fig. 6.33) que les concentrations moyennes sur 24 heures ont dépassé deux reprises les seuils : (1) le 11/06/2023 où le PM<sub>10</sub> a atteint le seuil d'AIRPARIF (et de l'OMS) et (2) le 23/06/2023 où le PM<sub>10</sub> a seulement dépassé le seuil de l'OMS (48 µg/m<sup>3</sup>).



**Figure 6. 32. Répartition des concentrations moyennes sur 24 heures des PM sur une échelle journalière**

(Données du capteur PM de la période du 01/06/2023 au 29/08/2023)

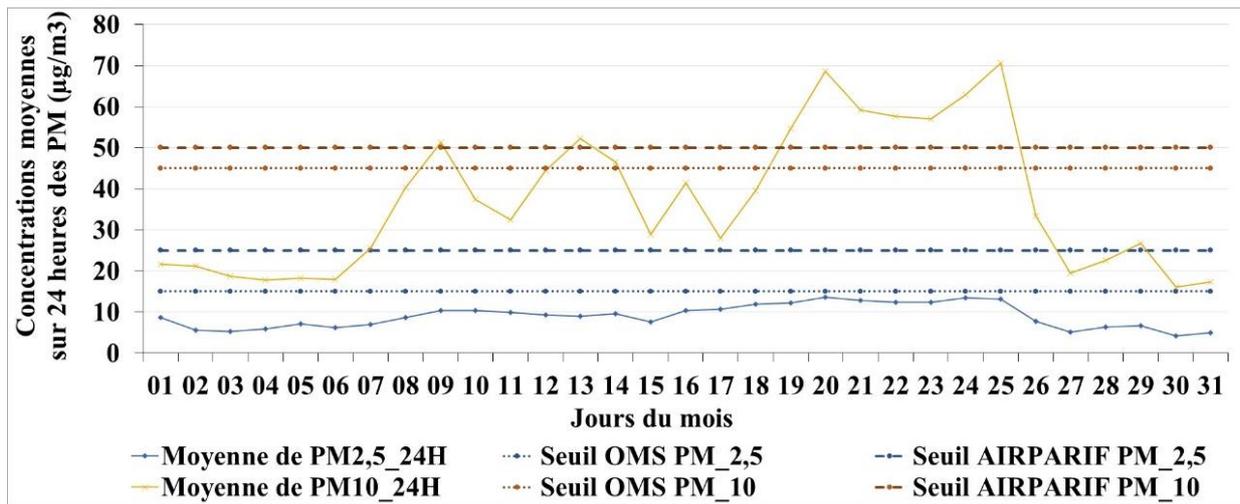


**Figure 6. 33. Répartition des concentrations moyennes sur 24 heures des PM sur une échelle journalière pendant le mois de juin 2023**

(Données du capteur PM de la période du 01/06/2023 au 30/06/2023)

Le mois de juillet 2023 était le plus pollué en ce qui concerne les PM (Fig. 6.34). Après deux premiers pics (9 et 13 du mois), on observe une séquence de 7 jours successifs (du 19 au 25 du mois) de dépassements des deux seuils (de l'OMS et d'AIRPARIF). Cette séquence correspond à une période où la température a considérablement grimpé pour atteindre 45 °C le premier jour et 48 °C le 24 du mois (à 16h elle a atteint 48,6 °C). L'humidité relative a oscillé entre 47 % pour le 22 du mois et 8% pour le 24 du mois (le 24/07/2023 : une journée typique de sirocco avec un vent du sud sud-est, d'une vitesse de 8 m/s capable de soulever, transporter et acheminer les poussières et particules plus facilement et pour de longues distances).

Pour le mois d'août 2023, aucun dépassement n'a été enregistré.



**Figure 6. 34. Répartition des concentrations moyennes sur 24 heures des PM sur une échelle journalière pendant le mois de juillet 2023**

(Données du capteur PM de la période du 01/07/2023 au 31/07/2023)

### 3.2- Variabilité spatiale des PM

Pour analyser la variabilité spatiale des PM, nous avons exploité les données des campagnes de mesures semi-itinérantes suivantes :

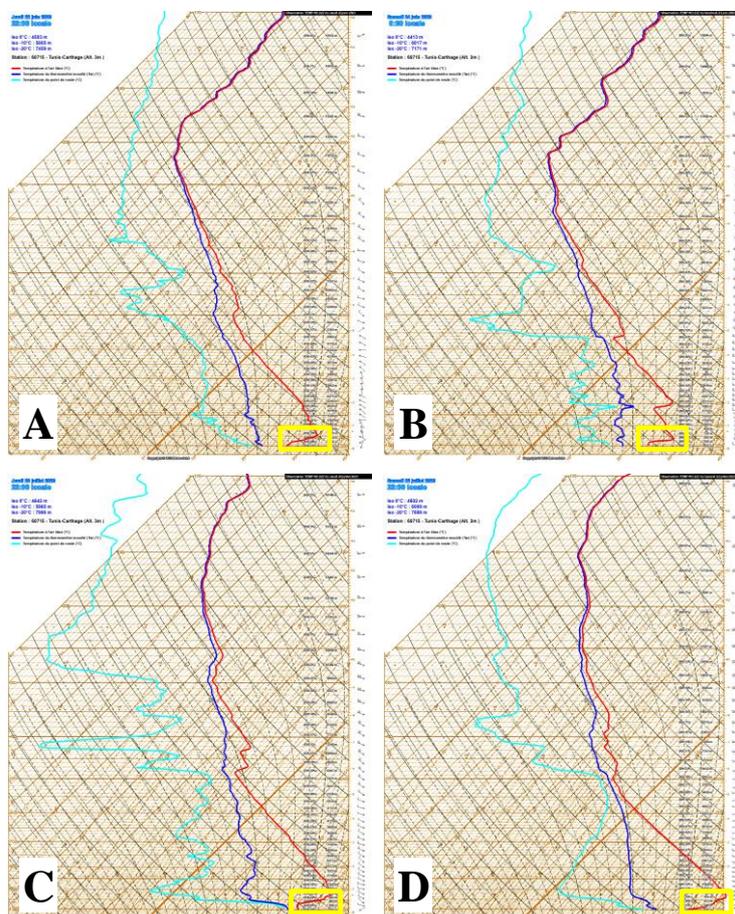
- Du 15 au 21 août 2021 : 192 mesures sont effectuées à l'échelle de l'agglomération de Bizerte
- Du 20 au 21 août 2021 : 70 mesures sont effectuées à une échelle plus fine (quartier européen).
- Du 03 au 05 mai 2022 : 45 mesures effectuées aux alentours de la Médina de Bizerte et le quartier européen
- Du 15 au 21 août 2022 : 250 mesures effectuées à l'échelle de l'agglomération de Bizerte
- Du 16 au 21 août 2022 : 240 mesures effectuées à une échelle plus fine (quartier européen).

Au début de la matinée, mis à part le site de Borj Taleb et ses environs ainsi que quelques sites au centre-ville, les concentrations des PM restent faibles.

Les PM suivent une distribution spatio-temporelle semblable, dans son schéma global, aux autres polluants. Les valeurs enregistrées des PM<sub>10</sub> sont presque le double de celles des PM<sub>2,5</sub>. Leurs répartitions spatiales est fortement synchronisée. Dans ce travail nous représentons uniquement la répartition spatiale des PM<sub>2,5</sub>.

Si la corniche reste « propre » le matin, elle perd peu à peu cet atout et ce sous l'effet d'une augmentation du degré de fréquentation des lieux la nuit où la majeure partie de la population, surtout motorisée, cherche refuge sur cette ligne et les lieux de détente qui lui sont avoisinants.

Cette fréquentation est accompagnée par des dégagements contenant, entre autres, les PM (Fig. 6.35 – Fig. 6.39). Les conditions météorologiques sont stables (vent faible et inversion thermique) la nuit, en été (Dahech et Charfi, 2017), et favorables à l'accumulation des particules (Fig. 6.35).



**Figure 6. 35. Situations d'inversions thermiques coïncidant avec des dépassements des concentrations les plus importantes de PM<sub>10</sub> : 22 et 24 juin 2023, du 19 au 25 juillet 2023 (Meteociel, web)**

**Légende (Figure 6.35) :**

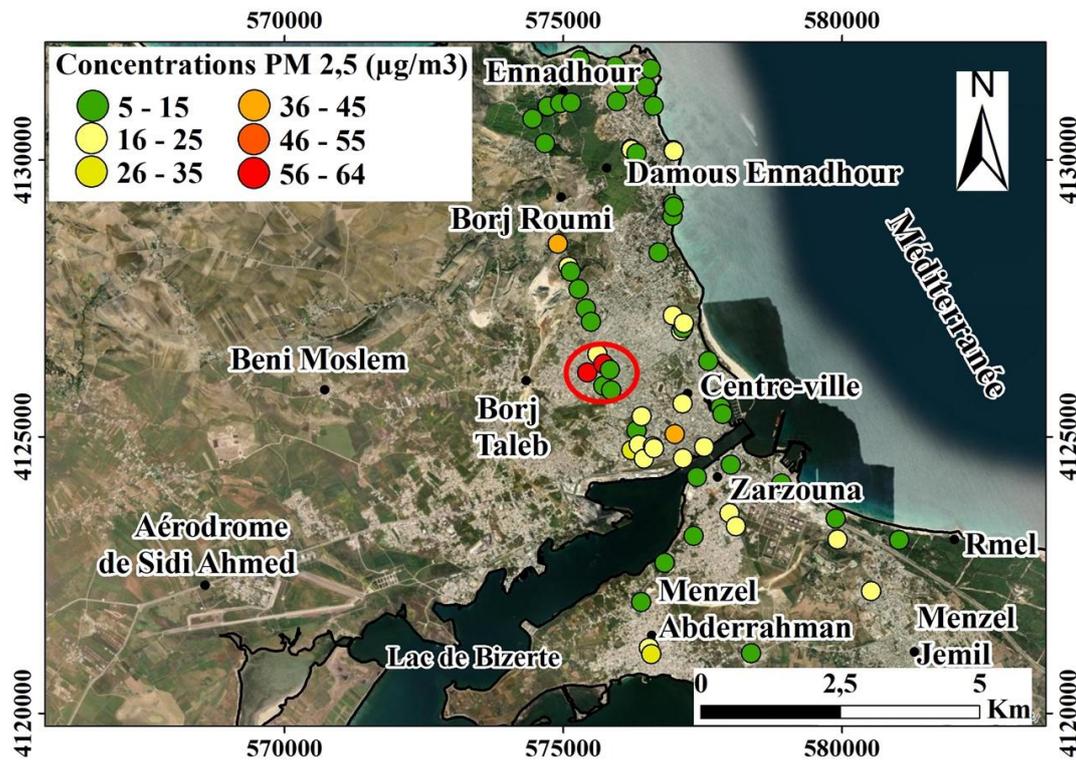
**A :** Jeudi 22/06/2023 à 23h00 (heure locale) : une inversion thermique jusqu'à 554 m d'altitude (en surface : vent du nord-ouest d'une vitesse de 2,5 m/s, température 24°C, point de rosée 22°C, pression 1019 hPa)

**B :** Samedi 24/06/2023 à 00h00 (heure locale) : (1) une inversion thermique jusqu'à 358 m d'altitude et (2) de 1800 m jusqu'à 2000 m (en surface : vent de l'ouest d'une vitesse de 1,9 m/s, température 24°C, point de rosée 22°C, pression 1016 hPa). Cette deuxième inversion, « frontale (limite de masses d'air) et/ou des couches de subsidence de la moyenne et de la haute troposphère, est suffisamment éloignée du substrat et ne représente pas de risque de surconcentrations de pollution près du sol » (El Melki, 2007).

**C :** Jeudi 20/07/2023 à 23h00 (heure locale) : une inversion thermique (1) jusqu'à 493 m d'altitude et (2) jusqu'à 6200-6400 m d'altitude (en surface : vent du nord-ouest d'une vitesse de 1,9 m/s, température 28°C, point de rosée 24°C, pression 1013 hPa)

**D :** Samedi 22/07/2023 à 23h00 (heure locale) : une inversion thermique (1) jusqu'à 346 m d'altitude et (2) jusqu'à 754 m d'altitude (en surface : vent du nord-est d'une vitesse de 1,6 m/s, température 30°C, point de rosée 24°C, pression 1015 hPa)

Aussi, certains travaux d'amélioration de la voirie conduit à la mise d'un matériel léger et facilement remaniable par un vent même de faible vitesse. La poussière générée par ces travaux de débitumage, dans leurs premières étapes, en est un exemple. Le matin du 03/05/2022 à Borj Taleb, le capteur a enregistré des valeurs importantes des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> : 159 et 431 µg/m<sup>3</sup> et l'après-midi 133 et 325 µg/m<sup>3</sup>. La route au moment de la mesure était débitumée et le vent soufflait de l'est sud-est à 4 m/s le matin (à l'heure de mesure 8h) et du nord-est à est l'après-midi (vers 17h30 à 18h).



**Figure 6. 36. Carte des concentrations des PM<sub>2,5</sub> à Bizerte**  
**(Mesures matinales de 07h30 à 08h00)**  
 (Campagnes de mesures en août 2021 et août 2022)

La situation de l'après-midi à Borj Taleb résulte de l'impact combiné du débitumage de la route et de l'apport du matériel en suspension de la carrière qui se trouve au nord du site. Entre la carrière et le site de Borj Taleb un couloir topographique de 1 Km de longueur ce qui contribue à l'acheminement, quand le vent souffle du nord ou du nord-est, de la poussière de la carrière (Fig. 5.13).

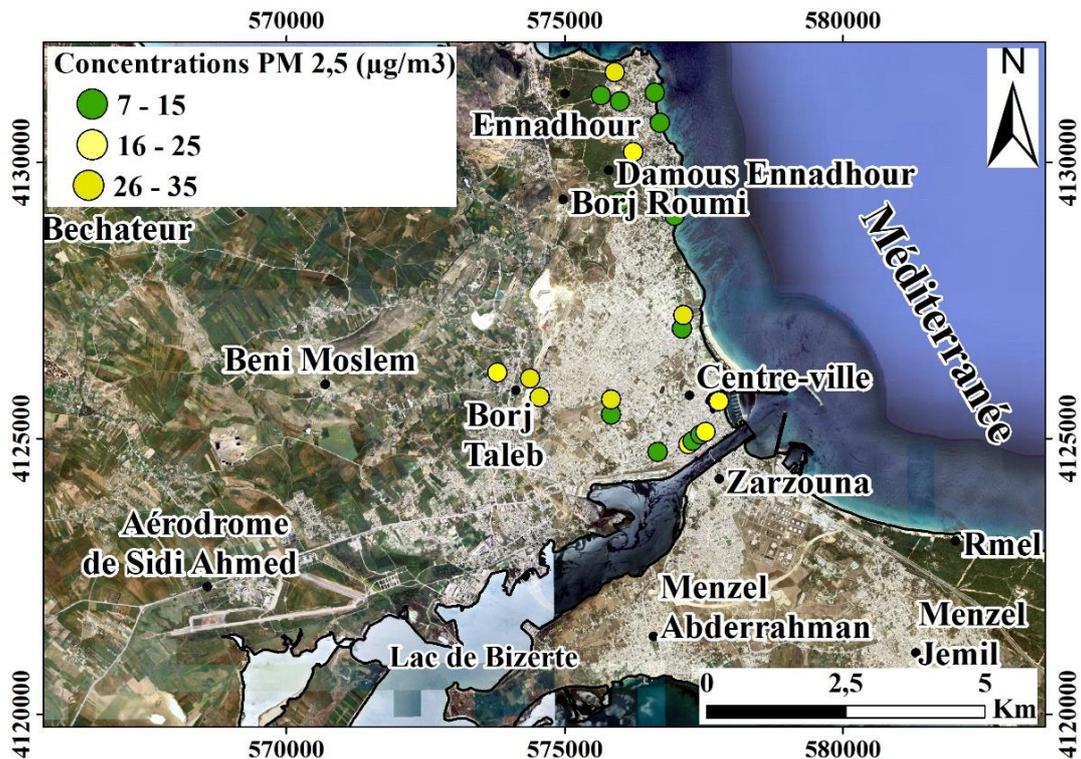


Figure 6. 37. Carte des concentrations des PM<sub>2,5</sub> à Bizerte

(Mesures en début d'après-midi de 12h30 à 13h00)

(Campagnes de mesures en août 2021 et août 2022 et Google Earth)

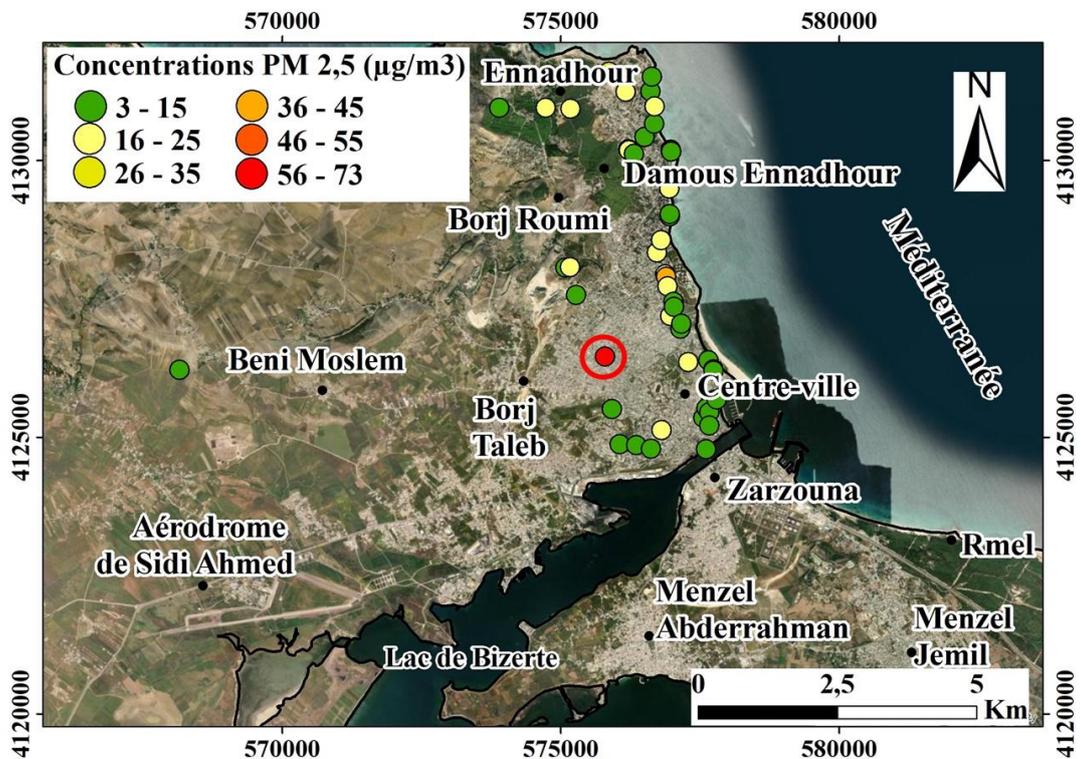
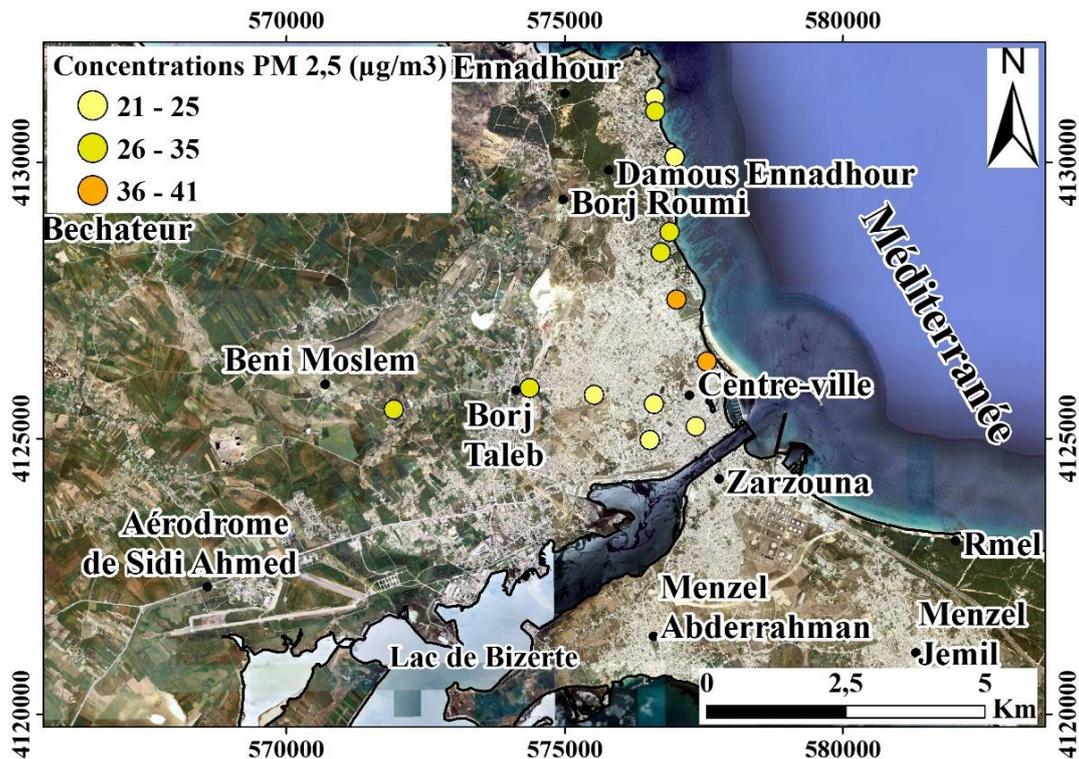


Figure 6. 38. Carte des concentrations des PM<sub>2,5</sub> à Bizerte (Mesures en fin d'après-midi de 17h30 à 18h00)

(Campagnes de mesures en août 2021 et août 2022)



**Figure 6. 39. Carte des concentrations des PM<sub>2,5</sub> à Bizerte**

(Campagnes de mesures nocturnes en août 2021 (de 21h00 à 21h30)  
et août 2022 (de 00h30 à 01h00))

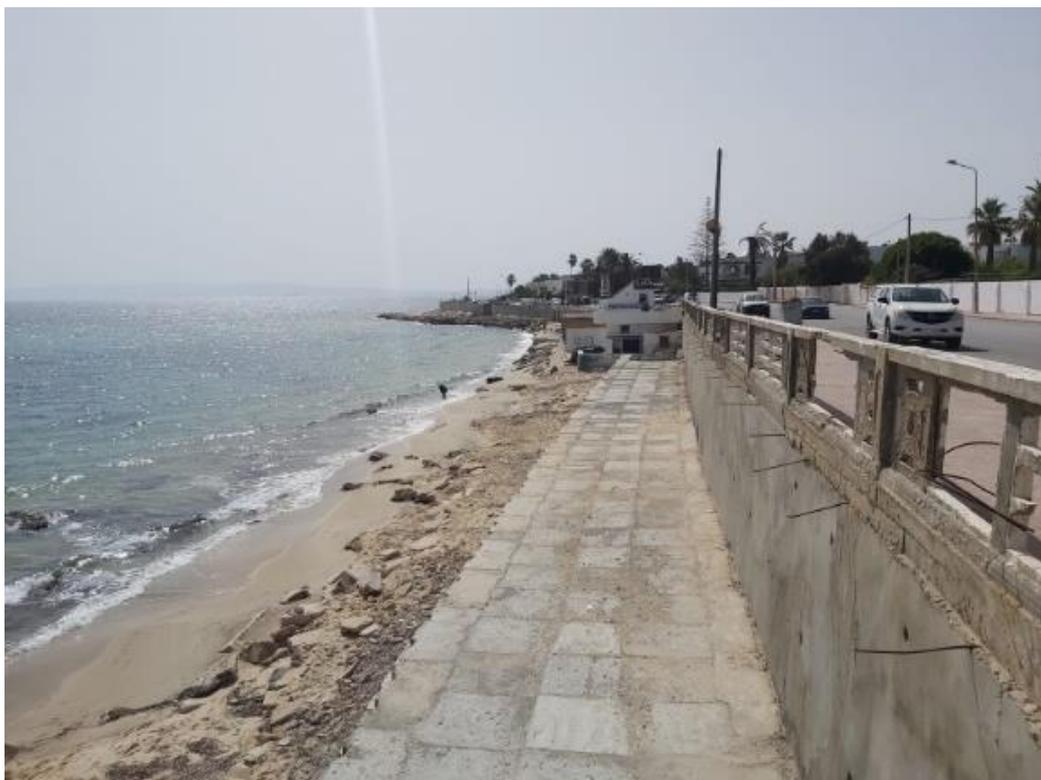
Ponctuellement et comme valeur instantanée, on a enregistré le 17/08/2021 en début de l'après-midi, avant le rond-point de Béni Moslem, des concentrations élevées de l'ordre de 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et ce sous l'effet d'une chasse-sable et d'une route débitumée et non arrosée.

L'effet de l'arrosage d'une route débitumée peut être illustré à travers les deux cas suivants : deux points distants de quelques 200 m ont des concentrations des PM qui vont du simple au triple. En effet, un point où la route était débitumée et non arrosée a eu respectivement des valeurs des PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> égales à 62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  et 107  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . L'autre point où la route était arrosée, les PM sont bien inférieures : 20 et 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Il est à signaler aussi que pendant nos différentes visites de la corniche en 2020, 2021 et 2022 des travaux de consolidation du mur de protection de la corniche sur 2,5 km étaient en cours. En fait, une portion de la digue protégeant la corniche de Bizerte a cédé, le 11 novembre 2019, durant la nuit, sous l'effet des vagues et des vents forts qui ont soufflé sur la région toute la nuit (Fig.6.40 et Fig. 6.41) (mareespeche, web).



**Figure 6. 40. La corniche de Bizerte après les intempéries en novembre 2019**  
(Kapitalis, 21/02/2020)



**Figure 6. 41. Une partie des travaux de protection et d'aménagement de la corniche de Bizerte**  
(Le Temps News 08/09/2022)

A une échelle plus fine, au niveau du quartier européen, cette constatation est aussi valide. En effet, le degré de concentration en PM, dépend de deux éléments importants :

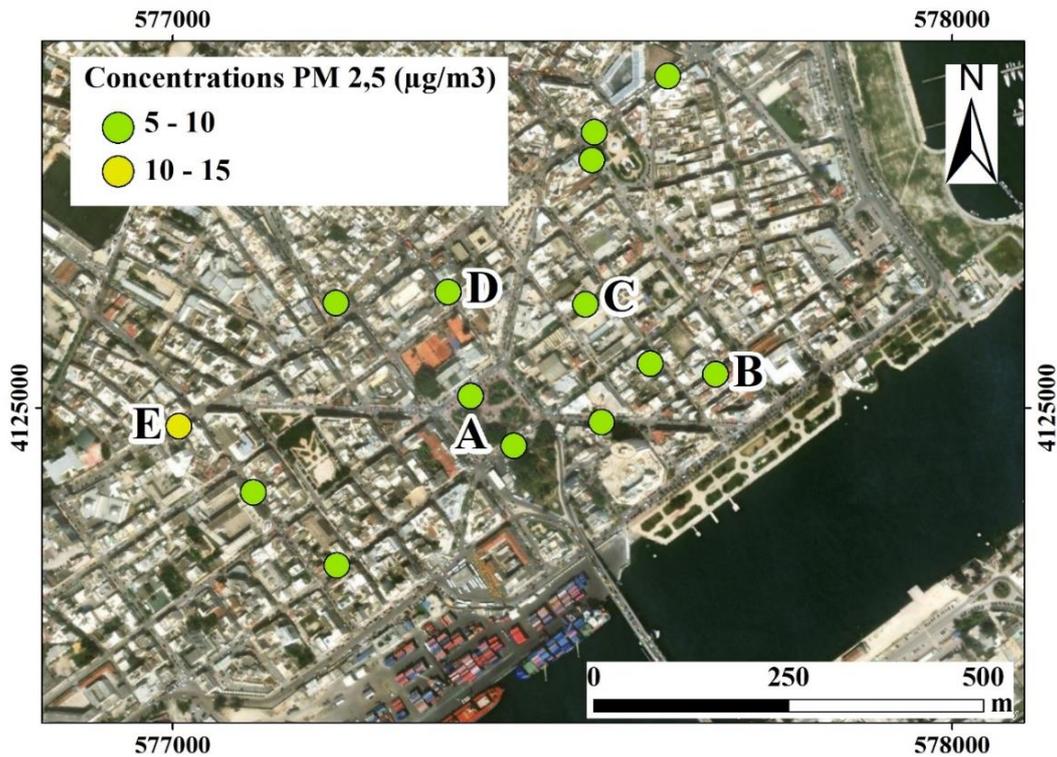
- Apport ou non du matériel en suspension allogène
- La situation du site (débitumé ou non, débitumé et arrosé ou non, les parkings des voitures non aménagés sont des sources importantes de poussières surtout pendant la saison sèche où elles sont plus faciles à transporter)

A ceci s'ajoutent les conditions météorologiques qui aggravent ou diminuent cette « contamination » de l'air. Le vent (sous forme d'une bonne brise ou un vent synoptique) est susceptible de « faire bouger » la poussière et la transporter dans des directions et lieux privilégiés par leurs expositions et leurs encaissements. La pluie, de son côté, contribue au dépôt humide de ces matériaux.

Le point E dans le quartier européen a gardé des niveaux les plus importants (même s'ils sont toujours faibles) tout au long de la journée pendant les différentes missions de mesure. Il se trouve aux alentours de l'agence du Banque de l'Habitat où une route a été débitumée en vue de son amélioration (Fig.6.42 et Fig.6.43).

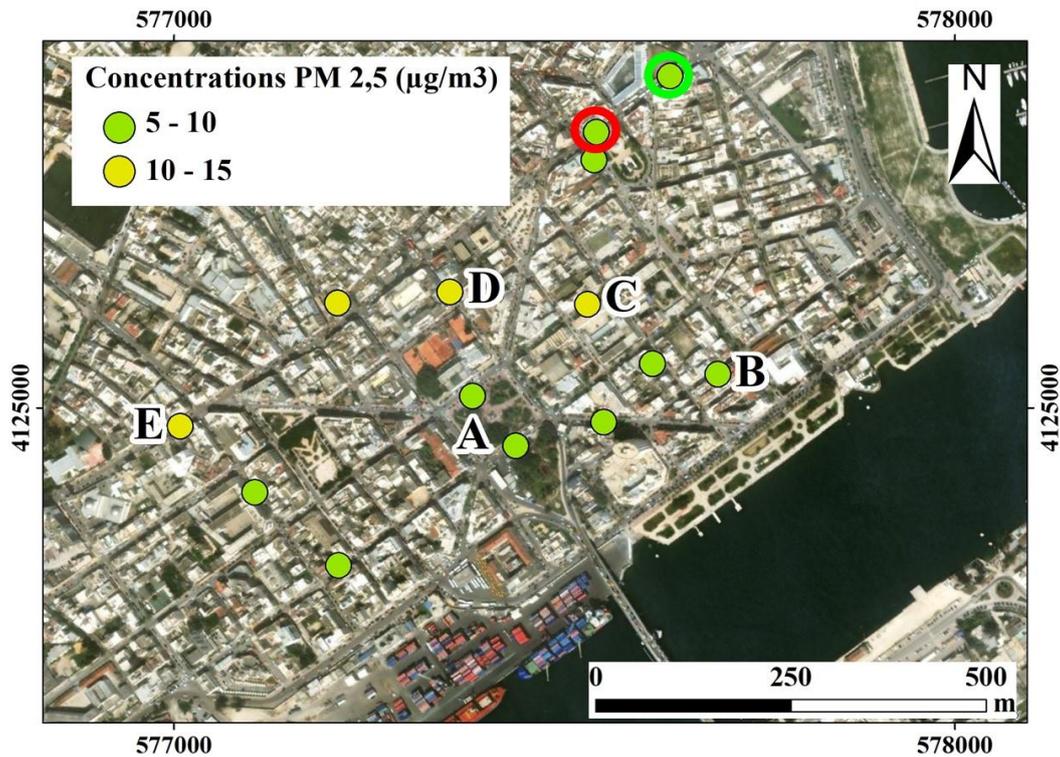


**Figure 6. 42. Site de mesure aux environs de l'agence de la banque de l'Habitat (point E)**  
(Clichés personnels, pris le 15/08/2022 à 18h05)



**Figure 6. 43. Carte des concentrations des PM<sub>2,5</sub> dans le quartier européen à Bizerte**  
 (Mesures en début d'après-midi de 13h30 à 14h00)  
 (Campagnes de mesures en août 2021 et août 2022)

Les points C et D (Fig. 6.44) ont vu augmenter leurs concentrations en PM (en fin d'après-midi) à cause d'un voisinage d'un parc non aménagé de stationnement des automobiles qui, lorsque la brise de mer est active avec une vitesse de 6-7 m/s joue le rôle d'une source de poussière. Les valeurs des concentrations en PM reflètent, la plupart du temps la situation instantanée du site lors de la mesure (à titre d'exemple, on a enregistré sur le site du point qui se trouve au niveau de la place Habib Bougatfa sur la route principale (entouré en rouge), une valeur des PM<sub>10</sub> égale à 94 µg/m<sup>3</sup> (PM<sub>2,5</sub> était à 60 µg/m<sup>3</sup>). Cette valeur représente 6 fois celle enregistrée à 100 m plus loin vers la mer (entouré en vert). La cause essentielle était « le passage d'un gros camion » comme on l'a noté lors de la campagne de mesure. Pour cette raison, on a opté lorsqu'on remarque que les valeurs sont « anormalement » élevées à identifier la cause et à refaire la mesure.



**Figure 6. 44. Carte des concentrations des PM<sub>2,5</sub> dans le quartier européen à Bizerte  
(Mesures en fin d'après-midi de 17h30 à 18h00)  
(Campagnes de mesures en août 2021 et août 2022)**

Les pluies du 17/08/2022 à 13h30 n'ont duré qu'une demi-heure (Fig. 6.45). Le sol étant très chaud, ces pluies se sont vite évaporées. Suite à ces pluies, nous avons effectué une campagne de mesures semi-itinérantes dans le quartier européen afin de cerner leur impact.

Même si elles n'ont pas beaucoup duré et que les concentrations en PM sont restées comparables à celles avant les pluies, l'effet immédiat est décelé à travers l'exemple suivant :

- Juste après les pluies (convectives) à la place de l'horloge à 15h30, les concentrations en PM étaient respectivement 45 et 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- 45 minutes après, le sol asséché, ces valeurs ont grimpé pour atteindre respectivement 65 et 108  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figure 6. 45. Pluies convectives du 17/08/2022 à 13h30 heure locale**  
(Photo extraite d'une vidéo tournée au centre-ville de Bizerte)  
(Cliché personnel)

#### **4- Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)**

Le CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) représente près des 2/3 des émissions mondiales de gaz à effet de serre induites par les activités humaines et a la particularité de rester présent longtemps dans l'atmosphère. C'est pourquoi on mesure usuellement l'effet des autres gaz à effet de serre en équivalent CO<sub>2</sub> (eq.CO<sub>2</sub>). Les émissions de CO<sub>2</sub> actuelles auront un impact sur les concentrations dans l'atmosphère et sur la température du globe pendant des dizaines d'années (ecologie.gouv.fr, web).

En extérieur, le dioxyde de carbone est produit majoritairement par les activités humaines qui libèrent 25 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> par an dans l'atmosphère (La combustion du pétrole participe pour 35,2%, le charbon pour 32% et le gaz naturel pour 12,8%. Les 20% restants sont produits lors des défrichages massifs des forêts équatoriales) (WWF, web).

L'augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub> permet d'améliorer les rendements en agriculture. Cependant, même si l'augmentation de rendement est constatée il en résulte une perte de qualité (teneur en nutriments dégradée pour le blé par exemple). La quantité se fait donc au détriment de la qualité (meersens, web).

À température et pression standard, le CO<sub>2</sub> est un gaz non inflammable, stable, sans couleur ni odeur franche. Sa densité relative plus importante par rapport à l'air (1,52) favorise sa distribution préférentielle dans les parties inférieures des bâtiments. L'air extérieur est constitué

en teneur volumique à 78,084 % d'azote, 20,946 % d'oxygène et à 0,934 % d'argon. Le reste est composé de gaz mineurs, dont le plus important proportionnellement est le CO<sub>2</sub> avec 380 parties par million (ppm). L'air contenu à l'intérieur des bâtiments comprend, quant à lui, en moyenne 0,08 à 0,1 % de CO<sub>2</sub> (Biefert et Perraud, 2009).

Dans une atmosphère riche en CO<sub>2</sub>, le patient inhale ainsi une fraction inspirée en CO<sub>2</sub> accrue et une fraction en O<sub>2</sub> plus faible. S'il exerce initialement un effet stimulant sur le système nerveux central, le CO<sub>2</sub> possède à des taux supérieurs à 10– 15 % des effets cérébraux déprimeurs (Scott *et al.*, 2009).

Il est recommandé que l'exposition moyenne d'une personne sur une période continue de 8 heures ne soit pas supérieure à 5 000 ppm. A savoir qu'une exposition de seulement 1000 ppm suffit pour remarquer des effets nocifs (maux de tête, vertiges, fatigue...) et cela peut entraîner des conséquences plus graves sur la santé (difficultés à respirer, rythme cardiaque augmenté, asphyxie...) si l'exposition aux concentrations recommandées en CO<sub>2</sub> ne sont pas respectées (Tab. 6.2).

Le CO<sub>2</sub> a été utilisé dans le passé comme anesthésique général, mais abandonné en raison des effets secondaires et en particulier du risque de convulsions associées (Mastrodicasa *et al.*, 2018).

**Tableau 6. 2. Effets du CO<sub>2</sub> sur le métabolisme**  
(meersens, web)

Concentration (ppm)	Symptômes
250 à 350	Niveau d'air extérieur de fond (normal)
350 à 1000	Niveau typique trouvé dans les espaces occupés avec un bon échange d'air
1000 à 2000	Premiers effets : plaintes de somnolence et de mauvais air
2000 à 5000	Maux de tête, mauvaise concentration, perte d'attention, augmentation de la fréquence cardiaque, légères nausées
5 000	Conditions d'air inhabituelles / présence d'autres gaz. Toxicité ou privation d'oxygène qui peut survenir. Limite d'exposition admissible en milieu de travail.
40 000	Niveau immédiatement nocif en raison de la privation d'oxygène
70 000	Suffocation même en présence d'oxygène
100 000	Inconscience, coma ou asphyxie en quelques minutes
> 250 000	Décès

En Tunisie, les émissions brutes sont passées de 29 Eq-CO<sub>2</sub> en 1994 à 46,6 Mté<sup>31</sup> CO<sub>2</sub> en 2012, soit une augmentation moyenne de 2,7 % par an. Les émissions nettes sont passées de 20,5 Eq-CO<sub>2</sub> à 32,6 Eq-CO<sub>2</sub> sur la même période, enregistrant une croissance annuelle moyenne de 2,6 %. Les émissions nettes par habitant se sont élevées en 2012 à 3 té CO<sub>2</sub>, ce qui reste bien inférieur à la moyenne mondiale (5 té CO<sub>2</sub> /hab.) (MALE et PNUD, 2012 et 2018) (Tab. 6.3).

**Tableau 6. 3. Synthèse des émissions brutes des GES directs en 2012 (eq-CO<sub>2</sub>)**

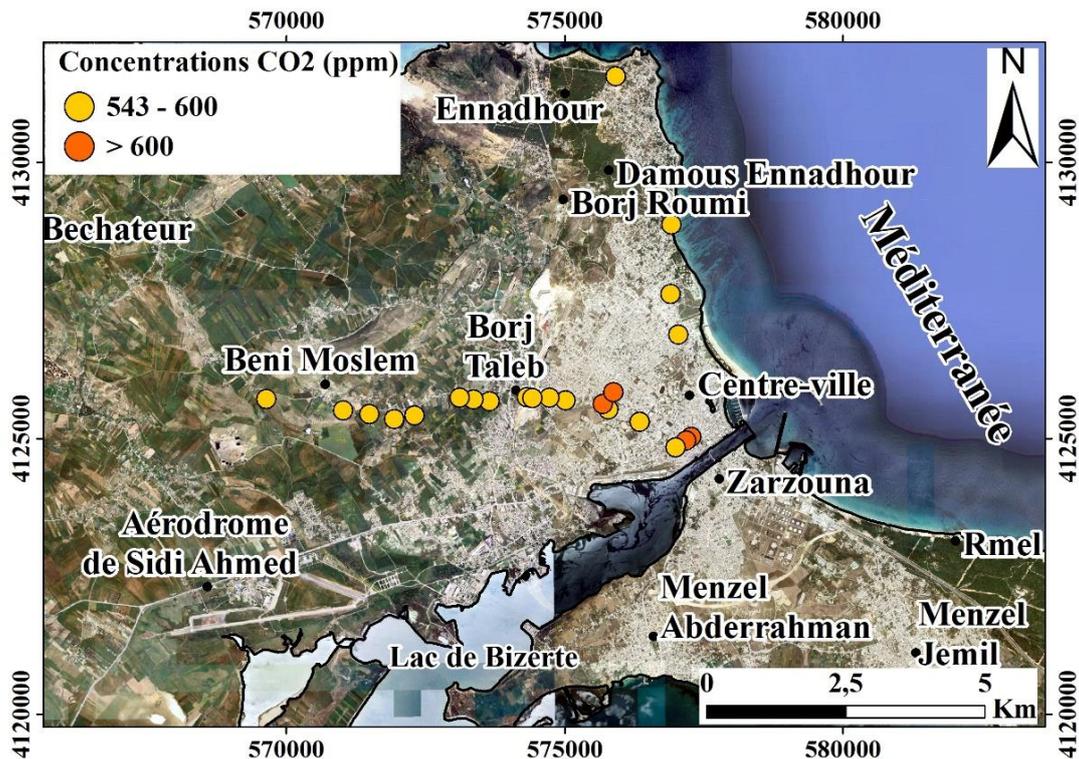
(MALE et PNUD, 2012 et 2018)

	Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	Méthane (CH <sub>4</sub> )	Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	Hydrofluorocarbures (HFCs)	Hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> ) <sup>32</sup>	TOTAL
<b>1 - Energie</b>	25 172,3	1 616,6	234,2			27 023
<b>1 – A. Combustion</b>	23 857,8	804,8	229,7			24 892
<b>1 – B. Fugitives</b>	1 314,6	811,9	4,4			2 131
<b>2 - Procédés industriels et utilisation des produits</b>	4 810,2	-	278,7	343,7	8,4	5 441
<b>3 - Agriculture, Forêt, et Autres Affectations des Terres</b>	6 568,2	2 636,2	1 945,1			11 150
<b>4 - Déchets</b>	17,0	2 892,2	109,2			3 018
<b>TOTAL</b>	36 567,7	7 145,0	2 567,2	343,7	8,4	46 632

A l'échelle de l'agglomération de Bizerte, la répartition des concentrations du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) montre une grande similitude entre l'après-midi (Fig. 6.46) et le soir (Fig. 6.47). Cependant, on peut distinguer deux noyaux au centre-ville où les concentrations sont plus élevées. Il s'agit d'un noyau aux alentours de la place Foch et un autre au rond-point du CRDA. Ceci résulte de l'effet des dégagements des véhicules à combustion.

<sup>31</sup> L'eq-CO<sub>2</sub> est une unité créée par le GIEC pour comparer les impacts de ces différents GES en matière de réchauffement climatique. Il s'agit d'un outil simplifié qui permet d'identifier des actions prioritaires pour lutter contre le réchauffement climatique et qui est notamment nécessaire pour mettre en place des marchés carbone. Pour résumer, le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre alors que le eq-CO<sub>2</sub> est une unité de conversion des différents gaz à effet de serre. 1 kg de CO<sub>2</sub> vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone (actu-environnement, web).

<sup>32</sup> Hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) : Utilisé comme isolant électrique et dans la production de magnésium. Les principales émissions sont notamment dues à son utilisation dans les équipements à haute tension, à la production de magnésium mais aussi à d'autres usages industriels. Ce gaz de synthèse est l'un des responsables du réchauffement climatique (actu-environnement, web)



**Figure 6. 46. Carte des concentrations de CO<sub>2</sub> à Bizerte**

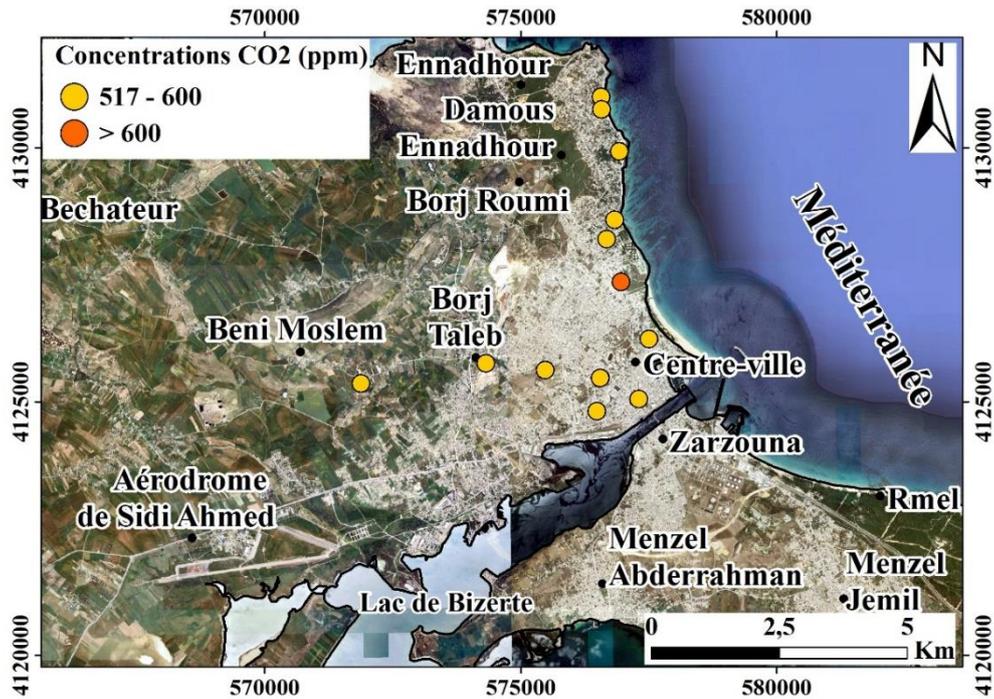
(Mesures en début d'après-midi de 12h30 à 13h00)

(Campagnes de mesures en août 2022)

La nuit, ces deux noyaux s'estompent au profit d'un autre qui se crée sur la corniche au niveau de la zone hôtelière. Ceci est dû à un changement de lieu et du motif de fréquentation. Si le centre-ville reste un lieu d'attraction pour son aspect administratif et de service tout au long des heures de travail (avec des degrés différents), la ligne de corniche pour le bien-être et la fraîcheur qu'elle offre est aussi un lieu de fréquentation importante, notamment pour ceux pouvant utiliser des moyens de transport à combustion.

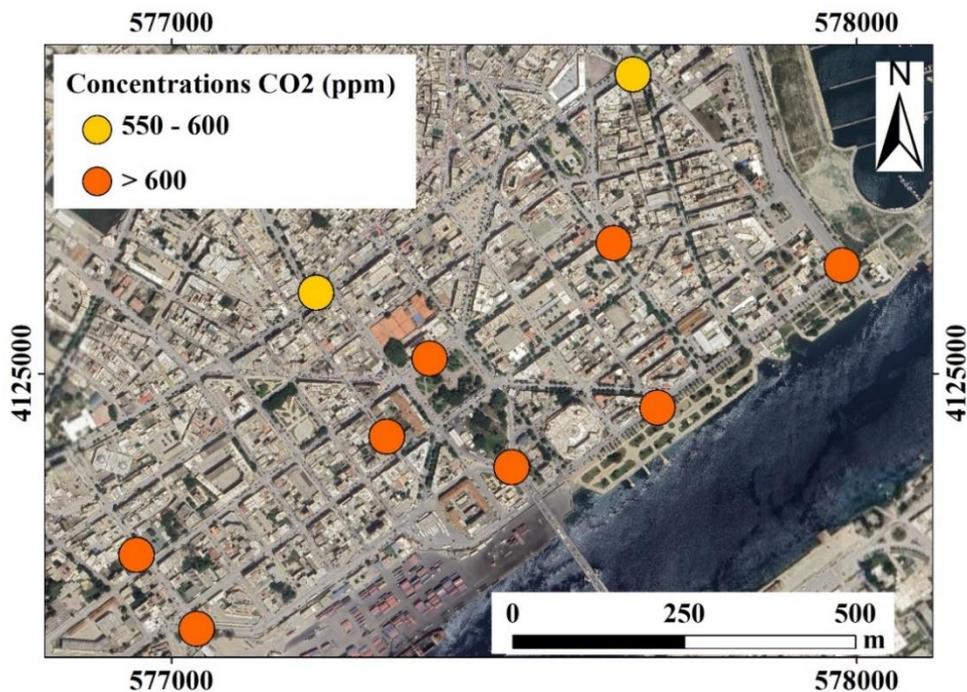
Ce qui est remarqué aussi est que les valeurs des concentrations en CO<sub>2</sub> sont plus importantes l'après-midi, la période pendant laquelle la brise de mer est active. Cette brise bloque la pollution au centre-ville et n'a pas la force de « nettoyage et purification » de l'air puisque l'apport continu en CO<sub>2</sub> dépasse le pouvoir de balayage de la brise.

Même si la ligne de corniche est très fréquentée, elle reste à un niveau moins important que le centre-ville (pendant l'après-midi). La nuit, quand la brise de terre est active, elle affecte plus cette pollution et la remanie et la conduit vers la mer.

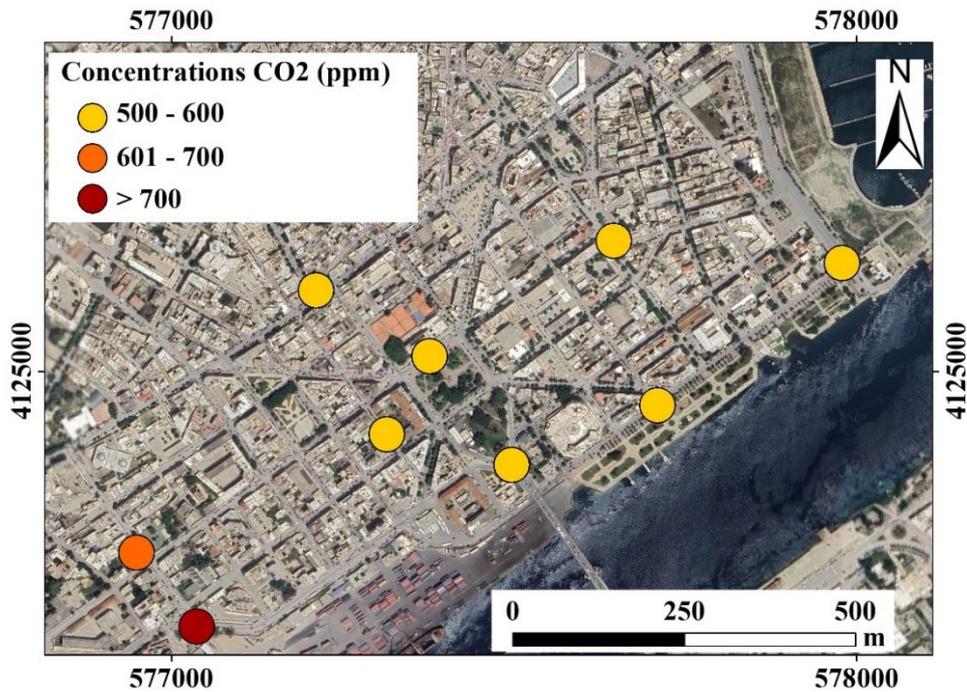


**Figure 6. 47. Carte des concentrations de CO<sub>2</sub> à Bizerte**  
 (Mesures nocturnes de 23h30 à 00h00)  
 (Campagnes de mesures en août 2022)

Dans le quartier européen (Fig. 6.48 - Fig. 6.50), les plus faibles valeurs de concentration en CO<sub>2</sub> enregistrées en fin d'après-midi résultent d'un départ vers la corniche.

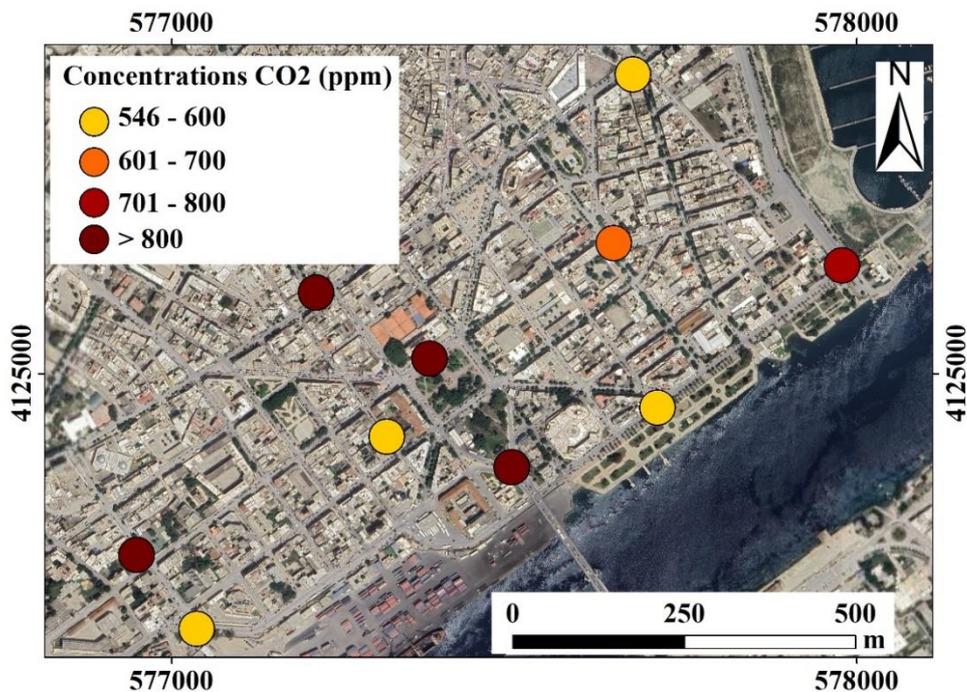


**Figure 6. 48. Carte des concentrations de CO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte**  
 (Mesures matinales de 07h30 à 08h00)  
 (Campagnes de mesures en août 2022)



**Figure 6. 49. Carte des concentrations de CO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte  
(Mesures en fin d'après-midi de 17h30 à 18h00)  
(Campagnes de mesures en août 2022)**

Au niveau du quartier européen, les concentrations élevées enregistrées la nuit (Fig. 6.41) résultent essentiellement d'un départ/arrivée instantané Bizerte-Tunis-Bizerte.



**Figure 6. 50. Carte des concentrations de CO<sub>2</sub> dans le quartier européen à Bizerte  
(Mesures nocturnes de 23h30 à 00h00)  
(Campagnes de mesures en août 2022)**

Dans cette partie, on a pu montrer le caractère sensible de la qualité de l'air à Bizerte. Les activités humaines combinées à ses conditions climatiques et topographiques contribuent dans une large mesure à la détérioration de la qualité de l'air dans certains quartiers de l'agglomération urbaine. La région de la Corniche sur la côte nord est un endroit idéal pour échapper à la chaleur estivale. Cependant, en raison du trafic routier intense, les concentrations de certains polluants atmosphériques sont élevées.

À une échelle plus fine, dans le quartier européen, l'analyse montre des points noirs où les concentrations des polluants étudiés enregistrent des valeurs élevées. Il s'agit essentiellement des rond-points et des croisements très fréquentés.

Comme dans toutes les études qui s'intéressent à la qualité de l'air, les mesures en continu des différents polluants atmosphériques restent sans doute la solution idéale pour suivre et évaluer la qualité de l'air. L'enrichissement de ces données par des informations complémentaires leur donne une plus-value qui appuie l'interprétation précise et efficace des différentes situations et à différentes échelles. A défaut d'une couverture spatiale et temporelle suffisante, le recours à des campagnes de mesures semi-itinérantes est une issue incontournable. La qualité de ces mesures repose sur :

- La représentativité spatiotemporelle des sites de mesure
- La densité des points
- Temps de déplacement entre les différents points
- L'équipement utilisé

Dans notre cas, les séries temporelles continues utilisées couvrent des périodes peu ou pas synchronisées temporellement entre les différents polluants. Or, cette synchronisation temporelle est nécessaire pour déceler les corrélations entre-eux. Cet aspect lacunaire des données disponibles sur la pollution atmosphérique à Bizerte ne permet que des conclusions partielles peu représentatives de la variabilité temporelle des polluants. Aussi, compté tenu du fait que les données météorologiques disponibles sont celles de la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed distant de 10 Km du trait de côte en arrière-pays vers l'ouest, l'explication de certaines situations de fortes ou faibles concentrations des polluants étudiés reste difficile à aborder convenablement. L'apport des données de la station météorologique automatique installée au centre-ville de Bizerte pendant l'été 2020 est d'une grande valeur car elles ont permis de s'approcher au mieux à l'environnement de mesure des polluants.

La comparaison des données de pollution en dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) entre le centre-ville et la zone de Zeqaq-Ezzouz, même pour une courte période, a permis de trouver des éléments d'explication des différences observées entre les deux sites aussi bien lors des mesures continues que pendant les mesures semi-itinérantes.

La cartographie est un moyen visuel important pour la représentation et l'interprétation des différentes situations de pollution atmosphérique primaire. Cette représentation temporelle et spatiale fait intervenir des paramètres communs entre les différentes échelles d'étude comme la configuration météorologique globale et le type de circulation atmosphérique, mais aussi des caractéristiques propres à l'échelle la plus fine (dans notre cas le quartier européen).

L'aspect multiscalair de cette étude devrait être plus abordable si on avait une couverture temporelle et spatiale plus importante et ce à la fois pour les données de la pollution atmosphérique que pour les données météorologiques.

La démarche et la méthode utilisées sont applicables pour d'autres zones d'étude. Même si les conclusions acquises restent tributaires des données disponibles utilisées, elles nous ont renseigné sur :

- La nécessité de multiplier et de densifier les sites des mesures en continu et itinérantes
- Les sites où on devrait installer des capteurs de pollution et des stations météorologique pour le suivi en continu
- L'importance de l'apport de la modélisation statistique et cartographique de la pollution en intégrant de façon étudiée les variables explicatives les plus efficaces

## **Conclusion**

L'agglomération de Bizerte est hétérogène et caractérisée par des entités géographiques complexes (bâti ancien côtoyant un bâti plus moderne, zones résidentielles, commerciales, industrielles, axes routiers, arrière-pays rural, ...), ainsi que des émissions de polluants atmosphériques variables.

La qualité de l'air dans un tel espace dépend fortement des conditions météorologiques, de la topographie, de l'agencement de l'espace urbain et des émissions.

A travers l'étude des différents polluants considérés dans ce chapitre (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM et CO<sub>2</sub>), l'agglomération de Bizerte peut être considérée comme un espace pollué à différents degrés dont la gravité dépend de l'échelle d'appréciation (agglomération, quartier) et de l'entité visée (centre-ville, arrière-pays, ligne de corniche, espace forestier couplé avec de l'urbain, ...).

Les conditions météorologiques ne peuvent pas être considérées comme les seules responsables de cette situation. Les différentes campagnes de mesure nous ont montré que les activités anthropiques (industrie polluante au sein de l'espace urbain et trafic routier) contribuent à la définition du degré de pollution de l'air dans l'agglomération de Bizerte.

Quel que soit la source de ces polluants, une attention particulière devrait être attribuée aux impacts de cette situation à Bizerte surtout que certains des polluants étudiés « *sont responsables d'un nombre de décès extrêmement important ... et de différentes natures : des cancers, des pneumonies, des AVC (accidents vasculaires cérébraux), des ruptures d'anévrisme. Des maladies cardiaques en très grand nombre...* » comme l'a mentionné le docteur Yves Souteyrand, représentant de l'OMS en Tunisie (CITET, web).

Une étude approfondie de ces aspects contribuera à la clarification de la situation environnementale et de ses impacts sanitaires et socio-économiques à Bizerte.

**CHAPITRE 7**

**ANALYSE ET CARTOGRAPHIE DE LA VARIABILITE  
SPATIO-TEMPORELLE DE LA POLLUTION  
PHOTOCHIMIQUE A BIZERTE : CAS DE L'OZONE  
TROPOSPHERIQUE**

L'ozone troposphérique, un polluant secondaire et un gaz à effet de serre résultant d'un ensemble de réactions photochimiques, connaît une variabilité dans le temps et dans l'espace, et ceci à différentes échelles, rythmée, entre autres, par la situation météorologique et les caractéristiques topographiques (Martin, 2009). Les activités et comportements anthropiques couplées avec les conditions météorologiques et topographiques ont contribué largement à la détérioration de la qualité de l'air et la santé humaine (OMS, 2018).

En Méditerranée, les situations radiatives favorables à l'activité photochimique sont fréquentes. En Tunisie, l'agglomération de Bizerte, ville moyenne au nord de la Tunisie (environ 350 000 habitants, INS, 2014), est l'un des plus importants pôles industriels du pays. Elle se distingue par une activité industrielle relativement diversifiée, installée à proximité des zones urbaines. Cette proximité de l'industrie émettrice des polluants primaires crée un environnement propice à la formation de l'ozone troposphérique. La qualité de l'air est contrôlée par la station de l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement, implantée en plein centre-ville, dans le domaine de la mairie (station urbaine). Ses données restent très ponctuelles dans l'espace.

L'intérêt de cette étude est de pouvoir comprendre la répartition spatio-temporelle de la pollution photochimique et de la cartographier à plusieurs échelles (région, quartier) afin de mieux appréhender la caractérisation de la qualité de l'air en un milieu dont les caractéristiques de l'occupation du sol et topographiques sont très variantes du côtier, à périphérique à caractère agricole, ou encore forestier.

Dans cette partie on va mettre en exergue la variation spatiotemporelle multiscalaire des concentrations d'ozone troposphérique dans l'agglomération de Bizerte et ses environs, notamment pendant l'été. De plus, nous visons à mettre en évidence les situations propices aux fortes concentrations d'ozone. Cependant, il est à clarifier que vu l'aspect lacunaire des données des mesures continues de l'ozone troposphérique à Bizerte effectuées par la station de l'ANPE, les conclusions tirées dans l'analyse sont tributaires des seules données de l'année 2011 retenue sur la base de la directive 2008/50/EC qui exige la disponibilité d'au moins 75% des données pour chaque échelle temporelle d'étude.

## **1- La variabilité temporelle de l'ozone troposphérique**

Située près de la côte, à proximité d'un axe principal de circulation routière et dans l'enceinte de la municipalité de Bizerte, la station de mesure d'ozone troposphérique subit l'influence de plusieurs facteurs d'ordre naturel (brises) et anthropique (émission des polluants primaires).

## 1.1- Régime des concentrations moyennes

### 1.1.1- Régime quotidien des concentrations moyennes d'ozone

L'analyse des variations intra-journalières des concentrations moyennes d'ozone au cours de la saison photochimique montre un rythme quotidien en phase avec l'intensité du rayonnement solaire (Fig. 7.1 et Fig. 7.2). En effet, après un minimum matinal à 7h inférieur à  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , une hausse relativement forte des teneurs en ozone (de  $\approx 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a été observée jusqu'à 12h parallèlement à l'intensification des rayonnements.

La croissance s'amenuise formant un palier de 13h à 16h avec un maximum de pollution par l'ozone de  $\approx 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Durant cette période, « l'intensité des deux processus de production et de destruction sont comparables » (Martin, 2008).

Entre 17h et 19h, une baisse ponctuelle des taux d'ozone est constatée. Elle est due, vraisemblablement, à la destruction d'ozone sur place, parallèlement à une remontée des concentrations en  $\text{NO}_x/\text{h}$  associées à une forte circulation automobile et en  $\text{SO}_x/\text{h}$ <sup>33</sup> et acheminée par la circulation du vent : le processus de destruction d'ozone s'accélère (Fig. 7.3).

A 22h, un palier s'amorce et se poursuit jusqu'à 3h du matin suivi d'une nouvelle baisse, qui se termine le lendemain vers 7h quand le cycle recommence.

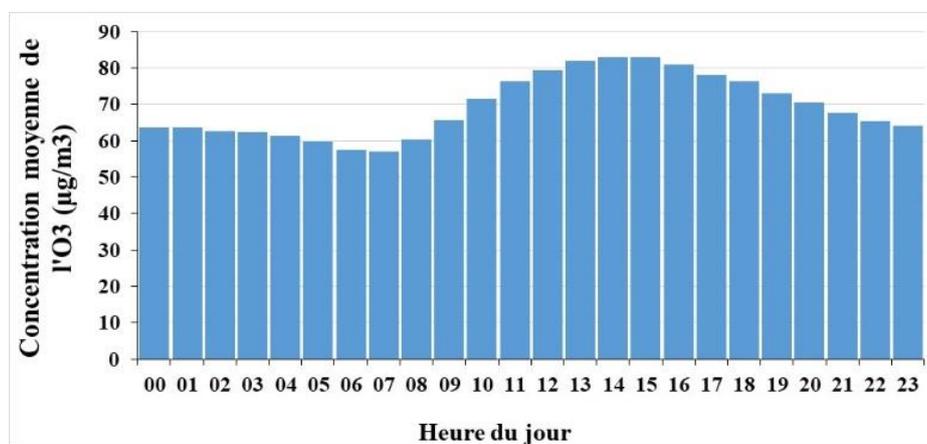
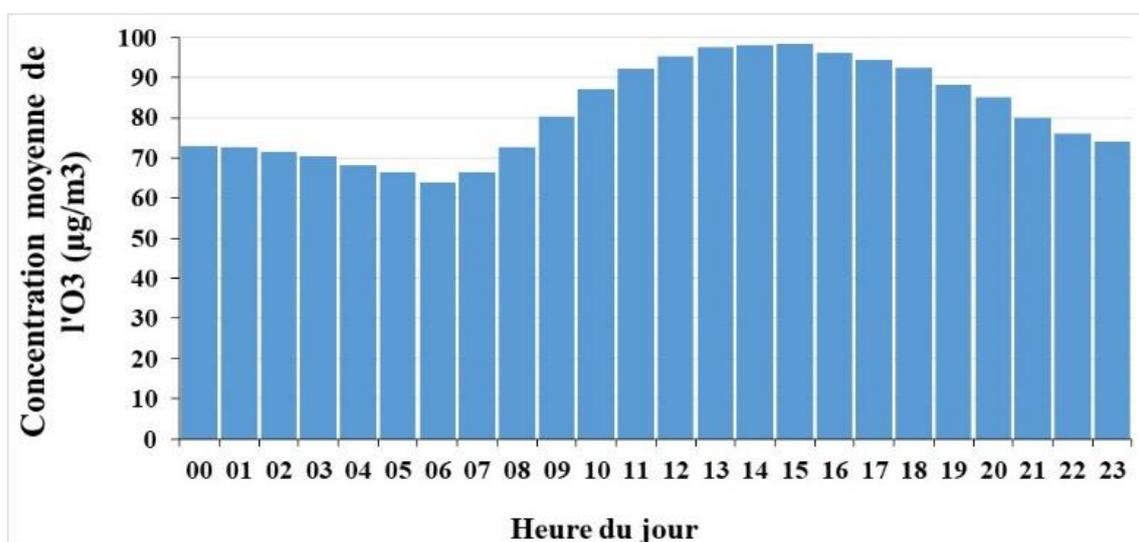


Figure 7. 1. Régime quotidien d'ozone (pendant toute l'année)

(Données ANPE, année 2011)

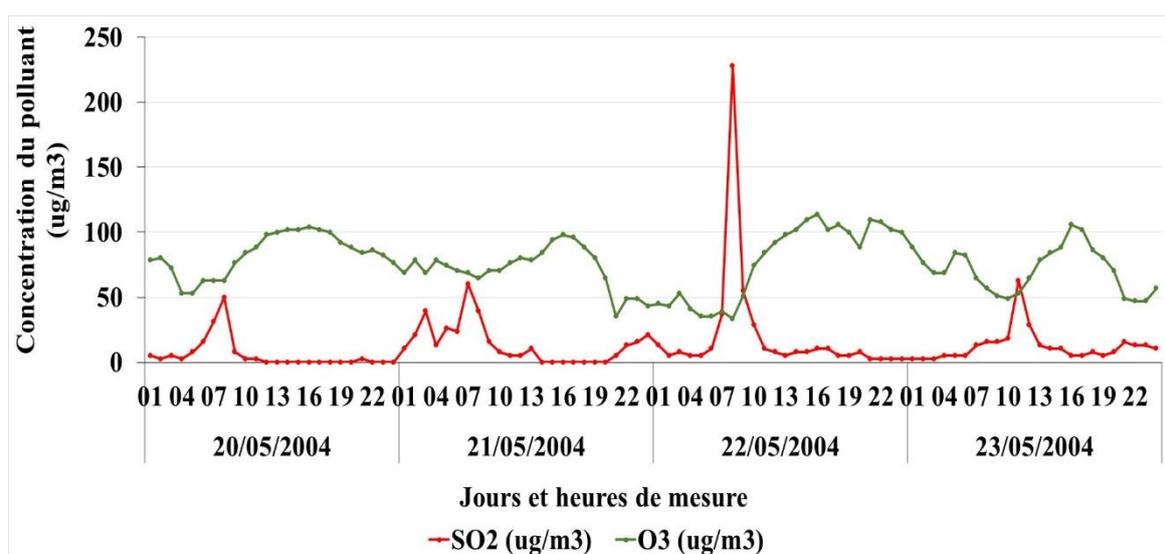
<sup>33</sup> Il provient essentiellement de la combustion des matières fossiles contenant du soufre (comme le fuel ou le charbon) et s'observe en concentrations légèrement plus élevées dans un environnement à forte circulation. Sur le Grand Tunis, « les cartes de distribution de la pollution en oxydes d'azote et en dioxyde de soufre, issues de mesures sur 14 sites, sont très similaires et opposées à celle de la pollution en ozone : les zones de fortes concentrations en ozone correspondent globalement aux zones de faibles concentrations en oxydes d'azote et dioxyde de soufre, et inversement. » (Kchih *et al.*, 2015)

D'autres sources reportent le contraire et disent que « les épisodes d'ozone troposphérique dans des sites ruraux et non ruraux semble être associées à des niveaux élevés en  $\text{SO}_2$  » (Meagher. *et al.*, 1987)



**Figure 7. 2. Régime quotidien d'ozone pendant la saison photochimique (avril à septembre)**

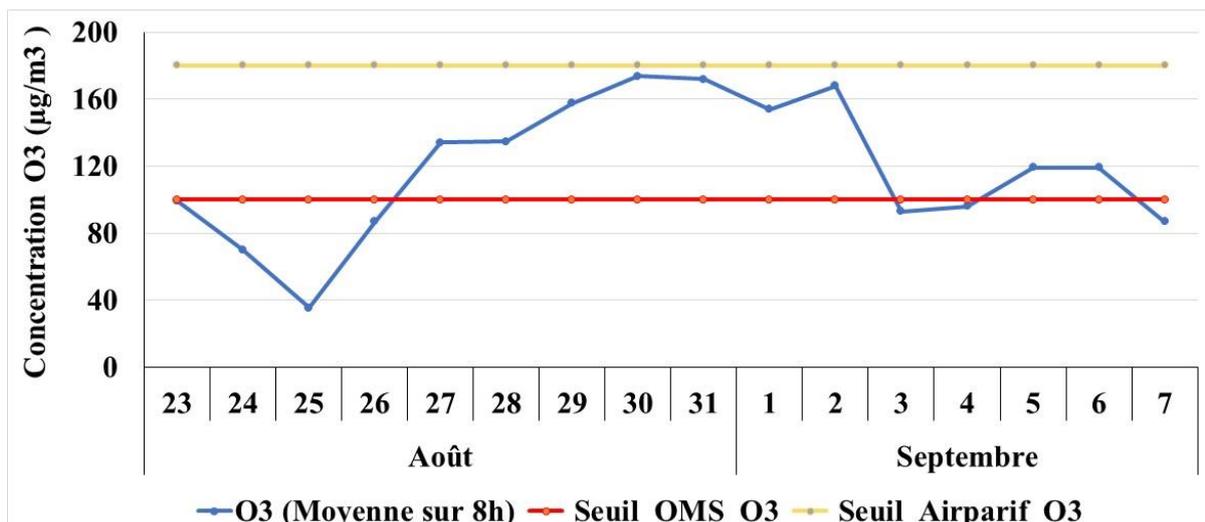
(Données ANPE, année 2011)



**Figure 7. 3. Relation entre la concentration en ozone troposphérique et le dioxyde de soufre à Bizerte (Site de Tunisie Telecom près de la station ANPE)**

(Données ANPE, 19-24 mai 2004)

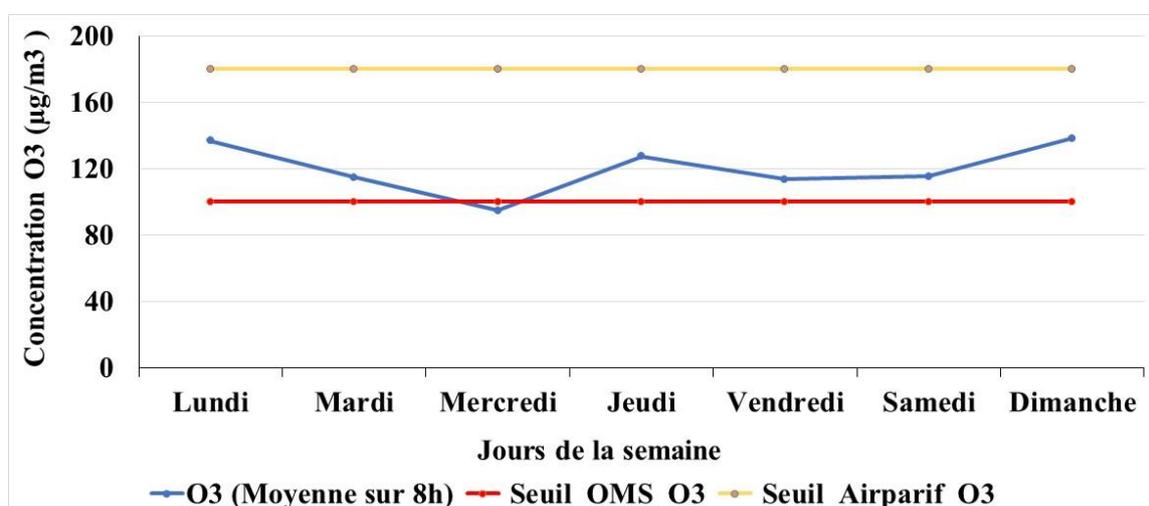
Au centre-ville, les capteurs installés à quelques mètres de la place Foch sur le balcon d'un immeuble et à une hauteur de 4-5 m, durant la période du 24/08 au 06/09 de l'année 2021, ont montré que la fin du mois d'août présente des concentrations en ozone troposphérique plus importantes que celles du début du mois de septembre (Fig. 7.4).



**Figure 7. 4. Concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 au centre-ville**

(Données du capteur de l’ozone troposphérique installé au centre-ville du 23/08/2021 au 07/09/2021)

A une échelle hebdomadaire, mis à part mercredi, les moyennes mobiles sur 8 heures de tous les jours de la semaine enregistrent un dépassement du seuil de l’OMS (Fig. 7.5).

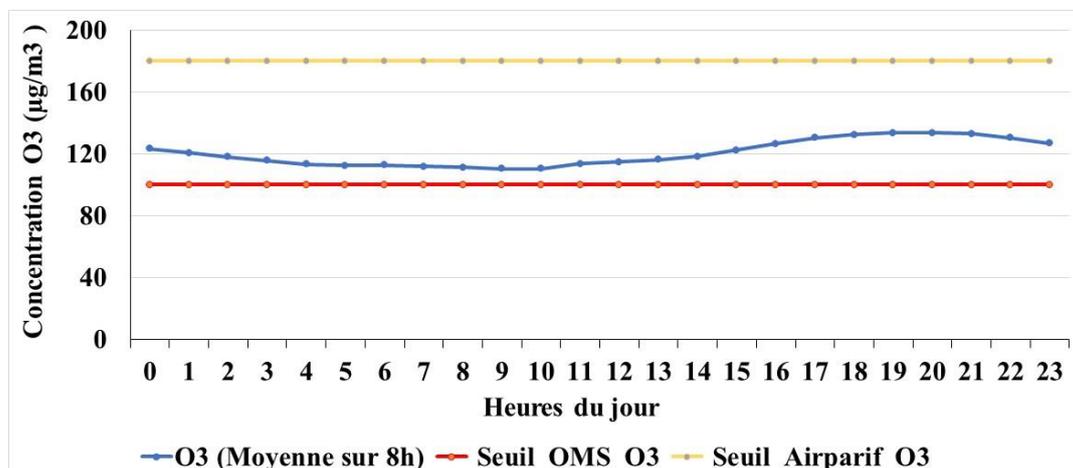


**Figure 7. 5. Répartition hebdomadaire des concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 au centre-ville**

(Données du capteur de l’ozone troposphérique installé au centre-ville du 23/08/2021 au 07/09/2021)

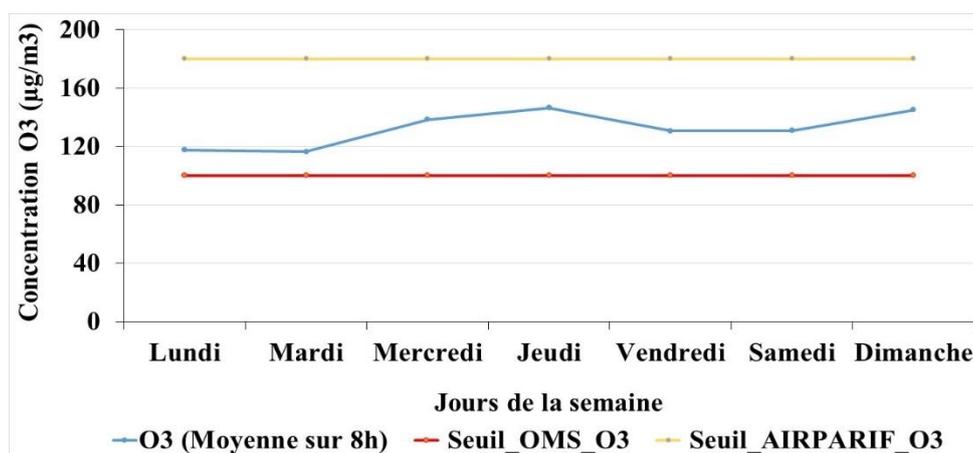
A une échelle quotidienne, durant la période du 24/08 au 06/09/2021, toutes les valeurs des moyennes mobiles sur 8 heures ont dépassé le seuil de l’OMS avec une augmentation observée à partir de 14h jusqu’à 23 h (Fig. 7.6). Ce fait s’explique par un fort ensoleillement durant la période étudiée. En effet, les températures maximales ont été au-dessus de la normale et

l'amplitude thermique diurne a dépassé 10°C tous les jours attestant de la limpidité de l'atmosphère. Nous remarquons une alternance entre une brise de mer modérée le jour venant de l'est à nord-est et une brise de terre très faible venant du nord-ouest la nuit, dans 90% des cas. Ces conditions sont favorables à pollution photochimique et expliquent les dépassements observés.

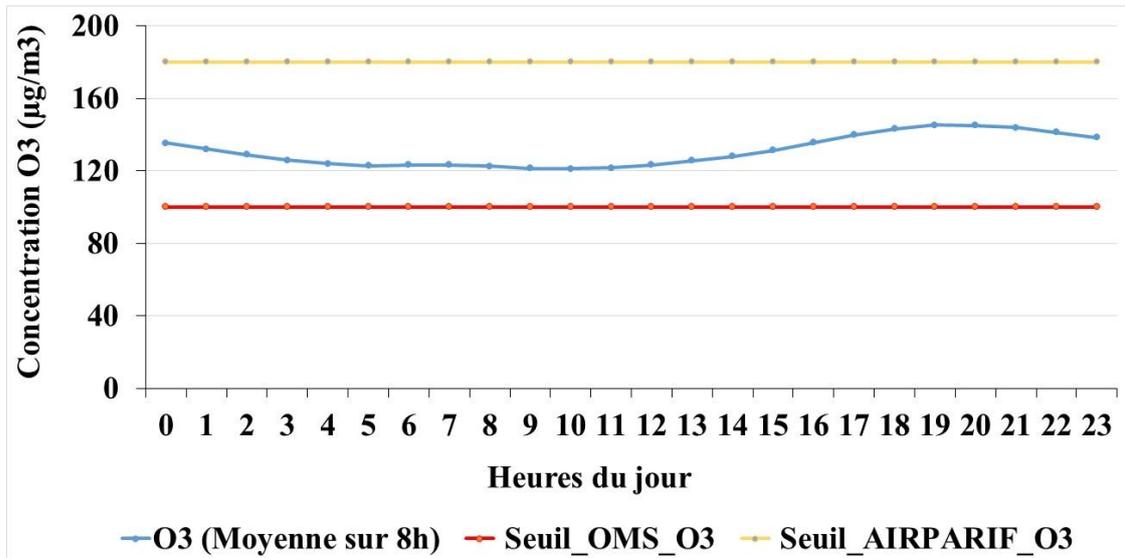


**Figure 7. 6. Répartition quotidienne des concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 au centre-ville**  
(Données du capteur ozone troposphérique installé au centre-ville du 23/08/2021 au 07/09/2021)

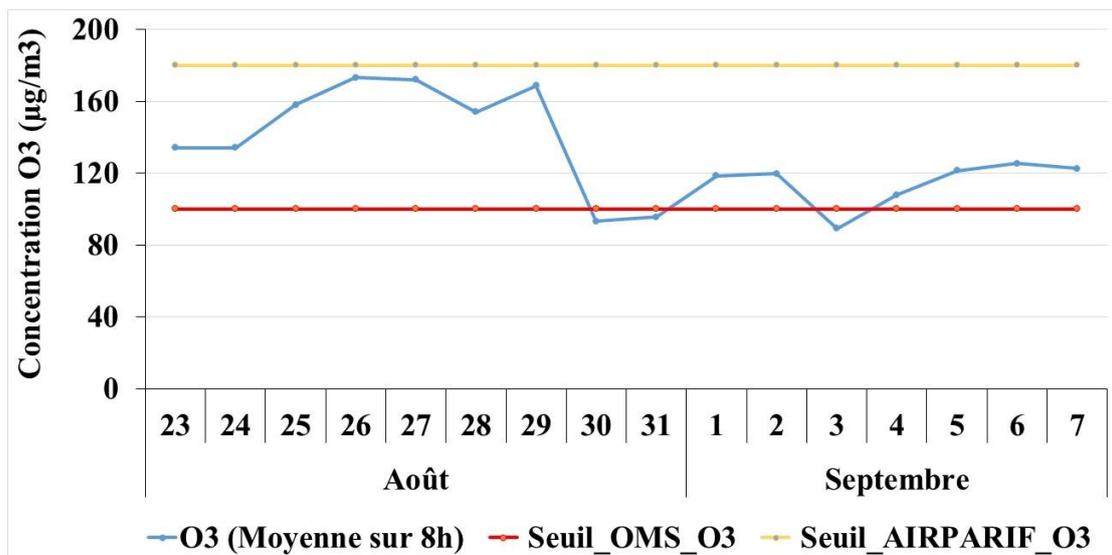
Les enregistrements de l’ozone troposphérique à Zeqaq-Ezzouz affichent une similitude globale avec ceux du centre-ville. La différence réside dans l’importance des concentrations atteintes à une échelle hebdomadaire. Aussi, une légère augmentation est observée à Zeqaq-Ezzouz à une échelle quotidienne (Fig. 7.7 – Fig. 7.9).



**Figure 7. 7. Répartition hebdomadaire des concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 à Zeqaq-Ezzouz**  
(Données du capteur ozone troposphérique installé à Zeqaq-Ezzouz du 23/08/2021 au 07/09/2021)



**Figure 7. 8. Répartition quotidienne des concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 à Zeqaq-Ezzouz**  
 (Données du capteur ozone troposphérique installé à Zeqaq-Ezzouz du 23/08/2021 au 07/09/2021)

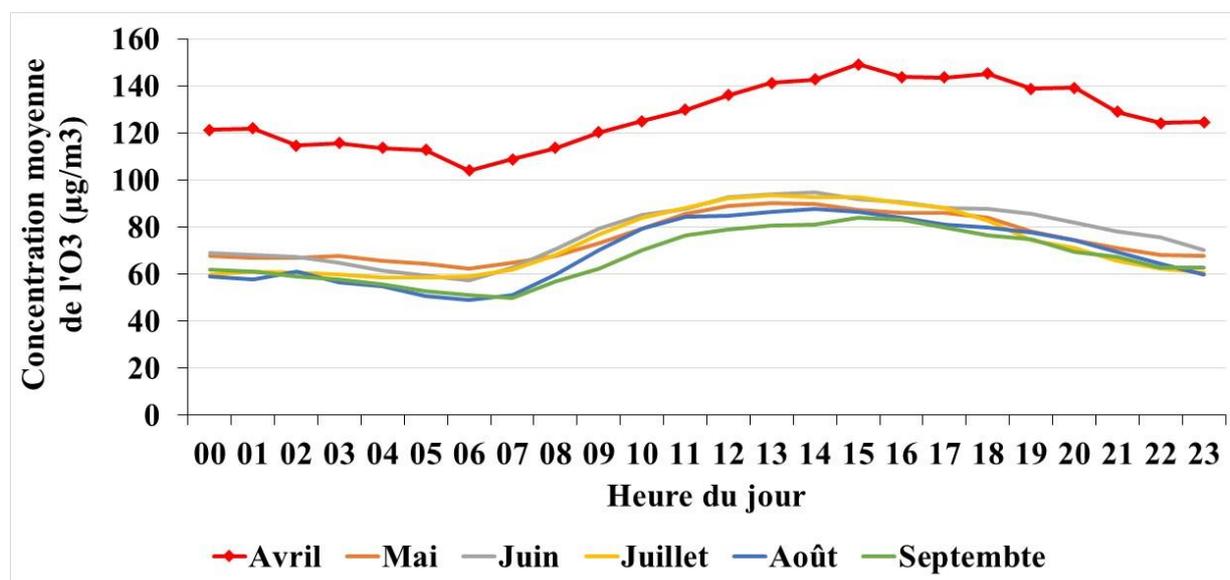


**Figure 7. 9. Concentrations en ozone troposphérique entre fin août 2021 et début de de septembre 2021 à Zeqaq-Ezzouz**  
 (Données du capteur ozone troposphérique installé à Zeqaq-Ezzouz du 23/08/2021 au 07/09/2021)

La différence la plus importante qu'on a dégagé c'est cette sorte de décalage de la date des pics atteints par les moyennes glissantes sur 8 heures (Fig. 7.4 et Fig. 7.9). Les valeurs les plus importantes sont enregistrées à Zeqaq-Ezzouz du 24/08 au 30/08. Les valeurs élevées, observées tardivement dans la journée s'explique par l'importance des polluants primaires en

fin de journée près de la Corniche. La légère baisse en début septembre au niveau de la Corniche s'explique par la fin des vacances estivales pour une partie de la population. C'est ce même facteur qui explique la hausse des concentrations au centre-ville le 1<sup>er</sup> et le 2 septembre.

Comparé mois par mois et durant la saison photochimique, le régime quotidien se caractérise par l'identification de deux groupes de disposition de courbes (Fig. 7.10). L'un qui regroupe les mois de mai, juin, juillet, août et septembre qui ont disposition générale similaire à celle de toute la saison photochimique, l'autre où s'individualise le mois d'avril avec des valeurs de concentration d'ozone nettement supérieures aux autres mois (presque de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) même si l'allure générale est la même.

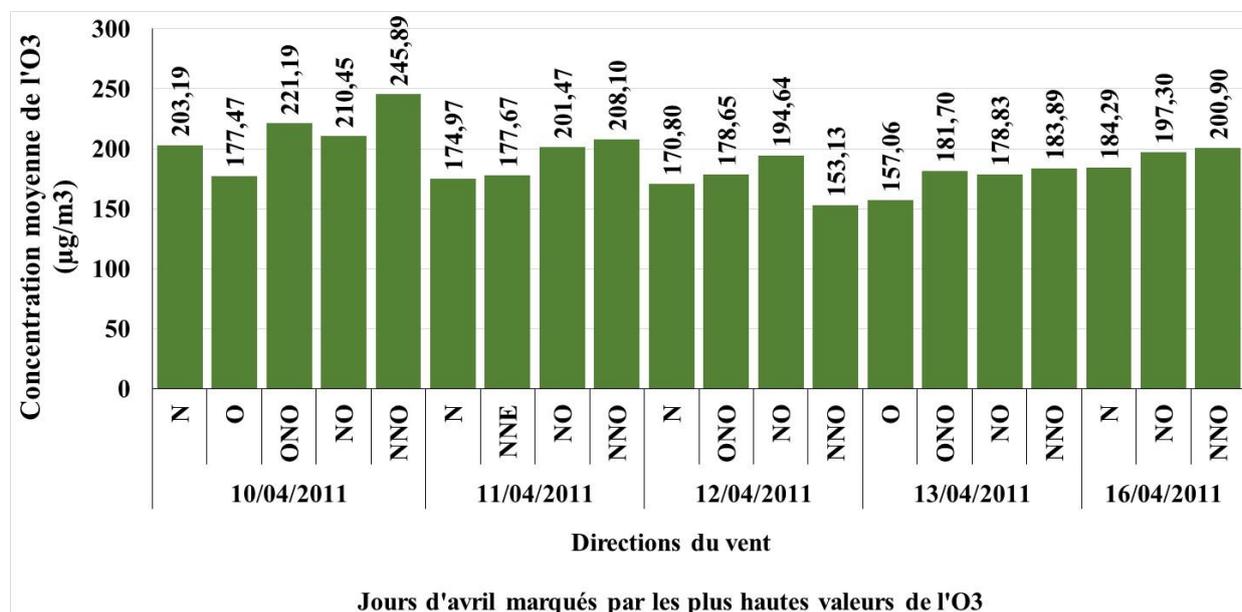


**Figure 7. 10. Régime quotidien de l'ozone troposphérique comparé mois par mois durant la saison photochimique**  
(Données ANPE, année 2011)

Il s'agit en détail de cinq jours (10-13 et 16 avril) marqués par les plus hautes valeurs de l'ozone troposphérique. De point de vue directions de vent, il s'agit du secteur entre le nord nord-ouest et l'ouest qui probablement acheminent de l'air chargé d'ozone et contribue à l'augmentation de sa concentration au niveau de la station, soit aussi transportent les précurseurs d'ozone et conduit à sa formation. Une « certaine turbulence peut aussi empêcher son dépôt » (Melki., 2007). Un échange vertical est aussi une cause qui peut être à l'origine de cette augmentation des niveaux de concentration d'ozone.

A une échelle quotidienne, considérant les données météorologiques de la station de l'INM, ce sont les directions du secteur nord nord-ouest qui coïncident avec la période horaire du pic de concentration d'ozone troposphérique (Fig. 7.11).

L'installation des couches d'inversion en fin de nuit tasse l'ozone au sol et il serait donc exposé au dépôt sec qui le détruit (Charfi et Dahech, 2015). Aussi, la brise de terre peut le transporter vers la mer.

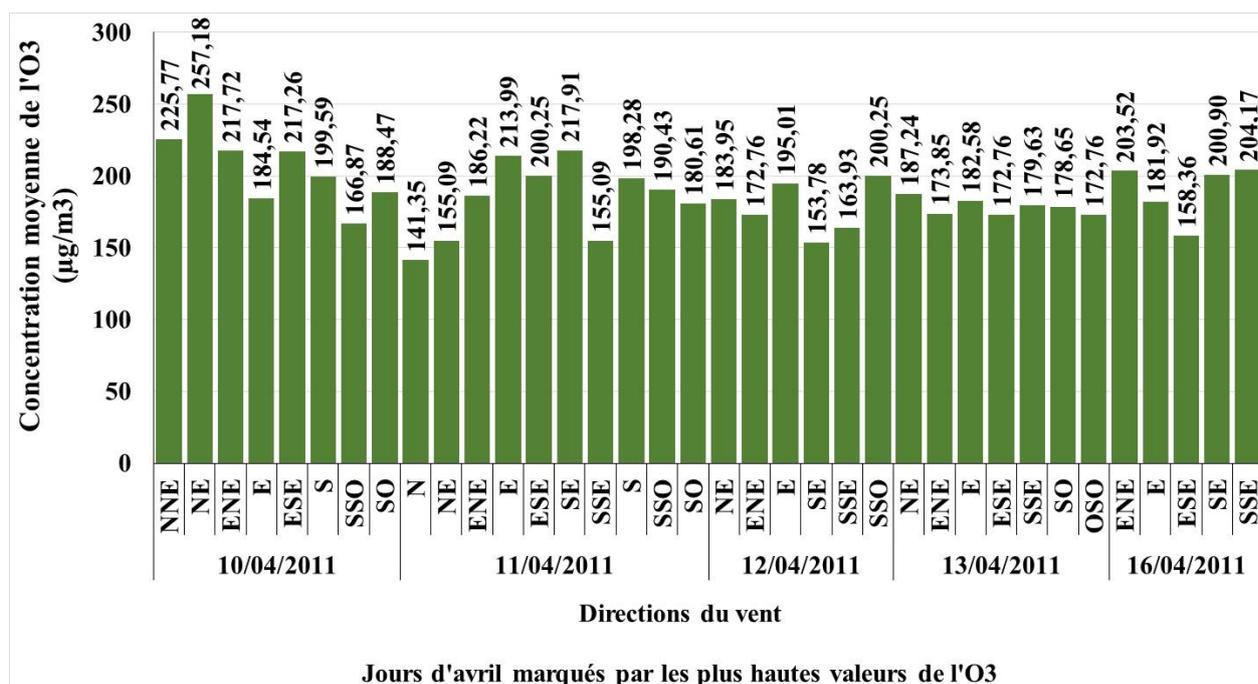


**Figure 7. 11. Directions du vent coïncidant avec les jours d'avril marqués par les plus hautes concentrations en ozone troposphérique**

(Données de la station météo de l'INM, données ANPE, année 2011)

Sur l'échelle de Beaufort, ces quatre jours oscillent entre « Petite brise » (pour les deux premiers jours, respectivement 19 km/h et 14 km/h) et une « Bonne brise » (pour le 12 avril 2011 et 16 avril 2011, respectivement 22 km/h et 31 km/h). Quant au 13 avril 2011, la vitesse du vent enregistrée est de 48 km/h (juste avant la limite entre Vent frais et Grand frais).

Il est à noter que les directions du vent mentionnées dans la figure 7.11 sont celle de la station météo installée à l'aérodrome de Sidi Ahmed. Distante de plus de 9 Km de la station ANPE, et puisque « *La circulation de la brise de mer est influencée par le lac, le relief et la ville.* » (Dahech et Charfi, 2017), ces directions sont influencées par un environnement différent. Pour cette raison, lorsqu'on considère les directions du vent telle que enregistrées à la station ANPE, c'est plutôt le secteur du nord nord-est qui apparaît plus sur le graphique (Fig. 7.12).



**Figure 7. 12. Directions du vent coïncidant avec les jours d’avril marqués par les plus hautes concentrations en ozone troposphérique**

(Données ANPE, année 2011)

Etant une journée de brise de mer, les concentrations élevées en ozone troposphérique le 11 avril 2001 dans la période allant de 07h à 17h sont attribuables à une récupération (par la brise de mer) de ce qui a été acheminé vers la mer par brise de terre la nuit.

### 1.1.2- Régime hebdomadaire des concentrations moyennes d’ozone : l’effet week-end

A l’échelle hebdomadaire, les concentrations d’ozone sont pratiquement similaires durant tous les jours de la semaine avec une légère augmentation le samedi, de l’ordre de 4 µg/m<sup>3</sup>. Conformément à la littérature, l’augmentation du samedi ou l’effet « week-end » (WE) se réfère à des changements dans les concentrations d’ozone au niveau du sol résultant de la baisse des émissions anthropiques (concentrations destructrices) en fin de semaine. Ce phénomène (WE) a été observé dans beaucoup d’autres atmosphères urbaines polluées (Rodrigo *et al.*, 2012). Cependant, nous avons enregistré des taux d’ozone plus haut le mercredi, chose qui peut paraître contradictoire avec l’intensification du trafic. Cette observation est valide à l’échelle de toute l’année 2011 ou à l’échelle de seule la saison photochimique.

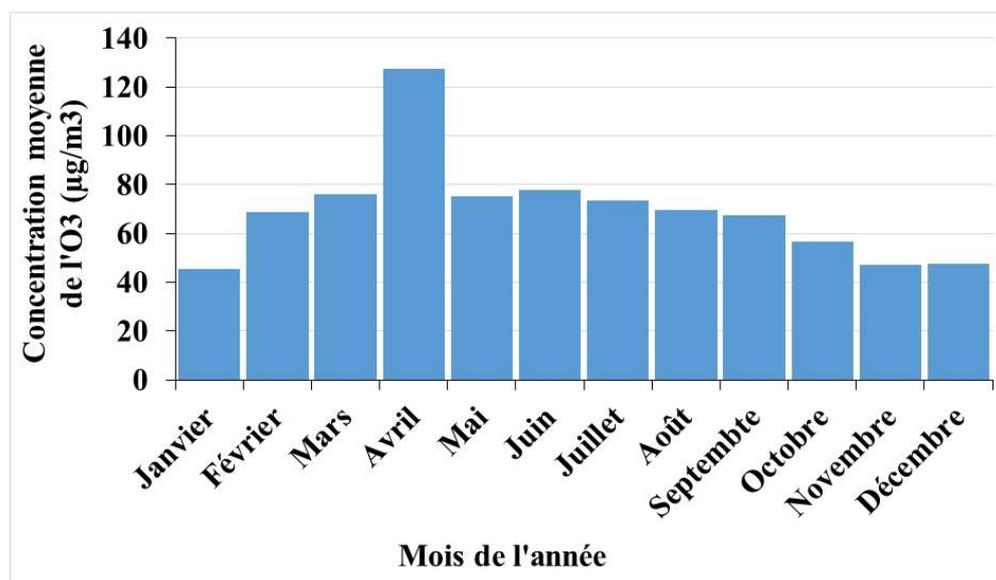
### 1.1.3- Régime mensuel des concentrations moyennes d’ozone

A l’échelle mensuelle, les concentrations moyennes d’ozone montrent des maximas au printemps où le mois d’avril s’individualise par une forte valeur dépassant le seuil de l’OMS (100 µg/m<sup>3</sup>), mais aussi celui de AIRPARIF (180 µg/m<sup>3</sup>).

La différence des mesures enregistrées en avril sont supérieures de plus de 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  par rapport aux autres mois (Fig. 7.13).

Ce phénomène est attribuable à « l'accumulation de gaz précurseurs où durant l'hiver des conditions de brassage moindre au sein de la couche limite atmosphérique favoriseraient une accumulation de polluants primaires ; au printemps et alors que l'apport de rayonnement UV augmente rapidement une explosion de production photochimique pourrait être la raison de la hausse des taux d'ozone » (Penkett *et al.*, 1993).

Il est à noter que les conditions météorologiques favorisant la production de l'ozone troposphérique (fortes températures, ensoleillement intense, ...) sont à l'origine de plus forts rejets de COVs biogéniques par la végétation (en essor au printemps).



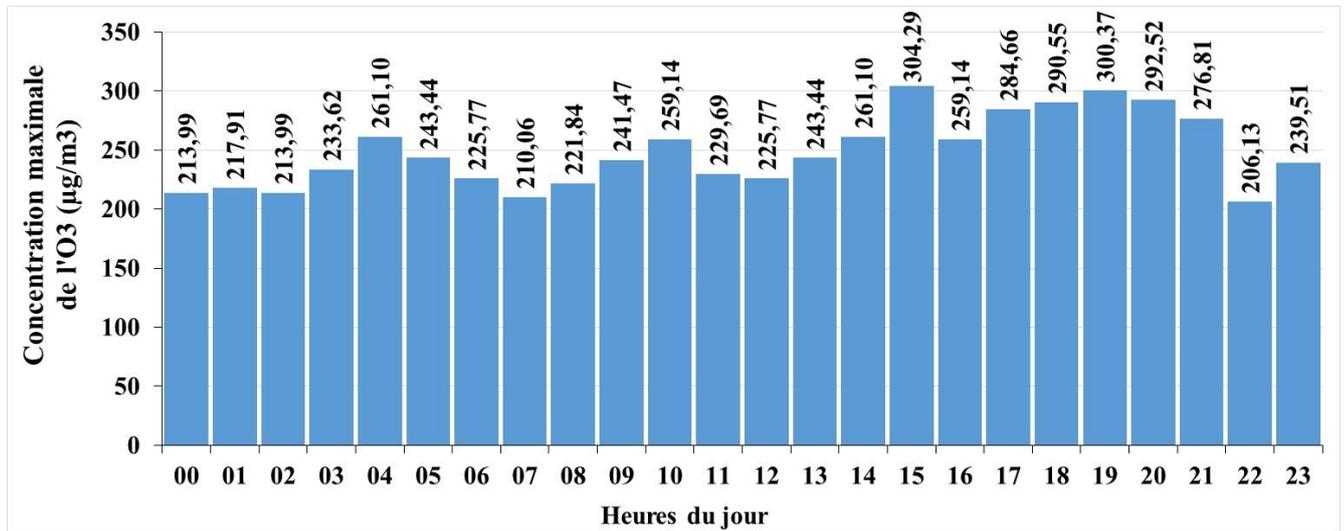
**Figure 7. 13. Répartition mensuelle des concentrations de l'ozone troposphérique**  
(Données ANPE, année 2011)

Lorsqu'on prend le mois d'avril en détail, les jours responsables de cette nette augmentation des valeurs moyennes de concentration d'ozone sont situés entre le 09 et le 16 du mois. La plus grande valeur est enregistrée le 10 avril suivie d'une autre le 16 du mois.

Le 16 avril 2011 et depuis 6h, la concentration d'ozone est accompagnée par une augmentation de la vitesse du vent jusqu'à 9h. A partir de cette heure, avec un changement de la direction du vent qui devient du secteur nord, l'augmentation de la vitesse s'accompagne par une baisse de la concentration d'ozone. C'est l'effet de brassage qui entre en action.

## 1.2- Régime des concentrations maximales d'ozone

Les analyses des données montrent que les valeurs maximales absolues à l'échelle intra-journalière oscillent entre des hauts et des bas durant toute la journée. Le maxima est enregistré entre 15h et 20h pendant la saison photochimique. La valeur la plus basse est enregistrée à 22h (Fig. 7.14).



**Figure 7. 14. Variation quotidienne des concentrations maximales de l'ozone troposphérique pendant la saison photochimique**

(Données ANPE, année 2011)

A l'échelle hebdomadaire, la courbe de répartition des maximas de concentrations d'ozone selon les jours de la semaine ne présente pas une spécificité particulière. La même courbe en cloche entre 13h et 22h existe, à l'exception d'un maxima à 19h et ce durant les trois derniers jours de la semaine (vendredi, samedi et dimanche) atteignant les 300 µg/m<sup>3</sup>.

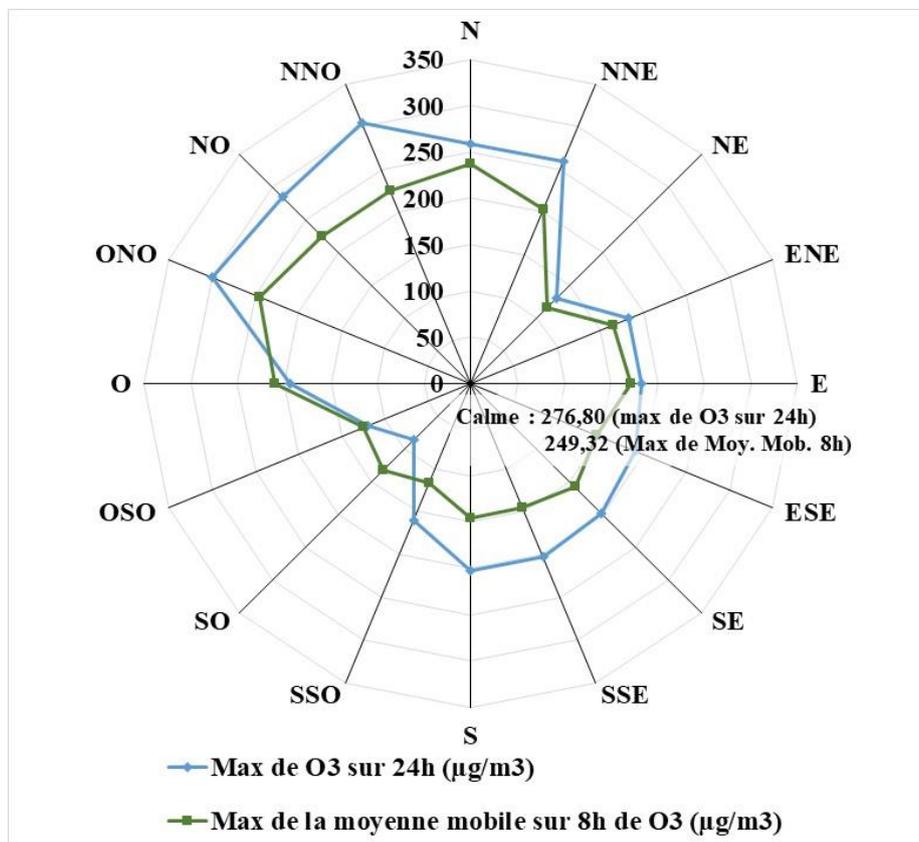
Les jours à caractère demi-ouvrable ont enregistré des valeurs maximales plus basses que les jours ouvrables ou non ouvrables. Il est à noter aussi que le maximum diurne des jours demi-ouvrables est atteint à 13h et donc avec 6h d'avance par rapport aux autres jours de l'année 2011.

Durant la saison photochimique, les fêtes à caractère civile enregistrent les maximas les plus importants. Les jours non fériés et la fête des martyrs, le 09 avril, enregistrent les valeurs les plus importantes. Mis à part les fêtes de la Femme, de la République et du Travail qui ont des courbes diurnes en phase avec l'intensité du rayonnement solaire, les autres jours enregistrent des degrés moindres de correspondance avec ce paramètre (intensité du rayonnement solaire).

La spécificité du 09 avril 2011 est-elle d'origine anthropique (fête des Martyrs) ? L'augmentation des concentrations d'ozone enregistrée simultanément avec une augmentation de la vitesse du vent, écarte ou estompe l'effet de brassage. Cette explication est combinée par l'apport, par brise de mer de l'ozone « soustrait » la nuit sous l'effet de brise de terre.

A l'échelle temporelle de la saison, le printemps s'individualise avec des concentrations maximales d'ozone les plus importantes. Il enregistre avec l'été les valeurs dépassant le seuil de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  les plus nombreuses.

Comme le montre les figures suivantes, les directions de vent associées aux maximas les plus importantes sont ceux de la composante nord-ouest par situations de calme (Fig. 7.15). Cette observation est valide à la fois à partir des données de concentration horaire d'ozone ou à partir des moyennes mobiles sur 8h.



**Figure 7. 15. Variations des concentrations maximales de l'ozone troposphérique pendant la saison photochimique selon la direction du vent**

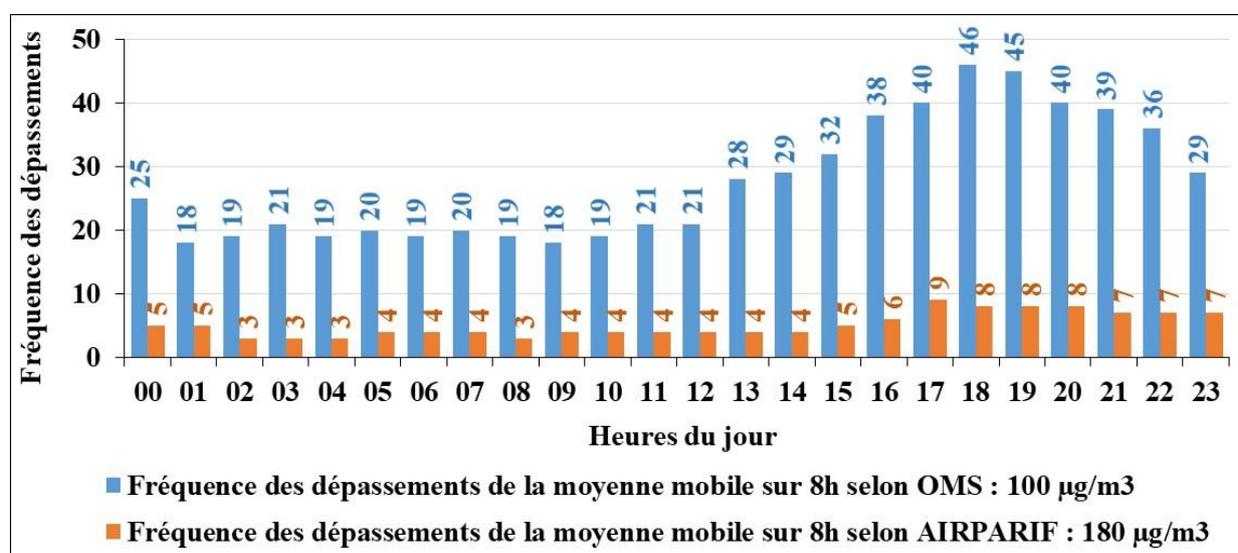
(Données ANPE pour O<sub>3</sub> et données INM pour le vent, année 2011)

### 1.3- Etude fréquentielle des nombres de dépassement des seuils de pollution par l'ozone

Les observations faites à partir de l'étude fréquentielle des dépassements des moyennes mobiles de 8h du seuil de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  traduisent plus nettement les conclusions reportées dans la bibliographie.

### 1.3.1- Etude fréquentielle diurne des nombres de dépassement des seuils de pollution à l'ozone

A l'échelle diurne, et tenant compte du seuil de l'OMS ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour une moyenne mobile de 8h), les dépassements ont été enregistrés dans 20% des cas entre 06h et 12h, dans 32% des cas entre 13h et 18h (le pic des dépassements est enregistré à 18h), et 28% des cas entre 19h et 23h. Les dépassements enregistrés entre minuit et 7h du matin totalisent 20%. La « cloche » dessinée entre 13h et 23h somme 60 % des dépassements. Ceci s'explique par l'effet « retardé » de concentration et « tassement » de l'ozone troposphérique qui s'étale jusqu'à 18h-19h. A partir de cette heure, les concentrations commencent à diminuer doucement (Fig. 7.16).

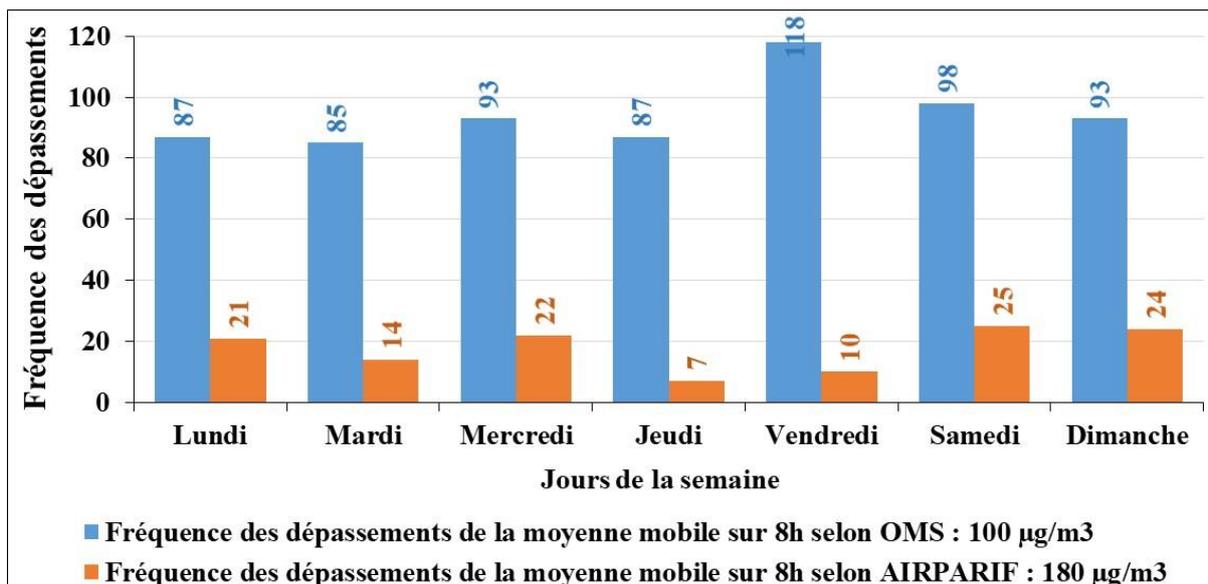


**Figure 7. 16. Fréquence des dépassements de la moyenne mobile sur 8h aux seuils indiqués par l'OMS et par AIRPARIF par heure du jour pendant la saison photochimique**

(Données ANPE, année 2011)

### 1.3.2- Etude fréquentielle hebdomadaire des nombres de dépassement des seuils de pollution à l'ozone

A l'échelle hebdomadaire, l'effet week-end est plus prononcé avec les dépassements du seuil de l'OMS. On remarque sur le graphique suivant (Fig. 7.17) que les derniers jours de la semaine (vendredi, samedi et dimanche) enregistrent la moitié des cas de dépassements.



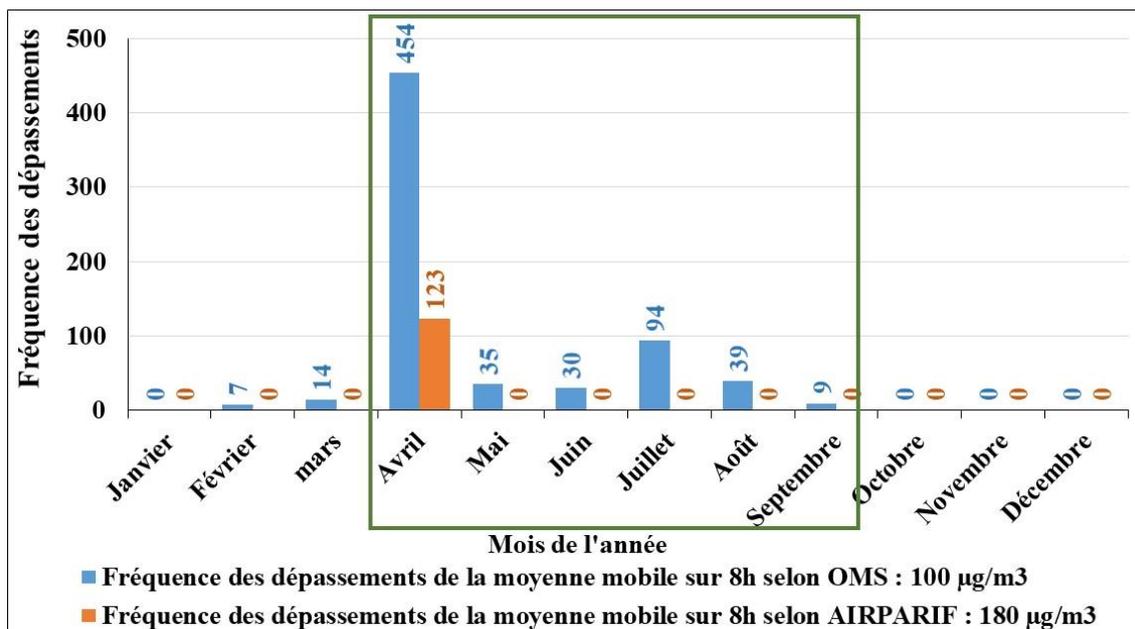
**Figure 7. 17. Fréquence des dépassements de la moyenne mobile sur 8h aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par jour de la semaine pendant la saison photochimique**

(Données ANPE, année 2011)

### 1.3.3- Etude fréquentielle des nombres de dépassement des seuils de pollution à l’ozone par mois

A l’échelle mensuelle, ce sont les mois du printemps et d’été qui enregistrent des dépassements plus importants de point de vue nombre (mais aussi comme on l’a vu valeur de concentration).

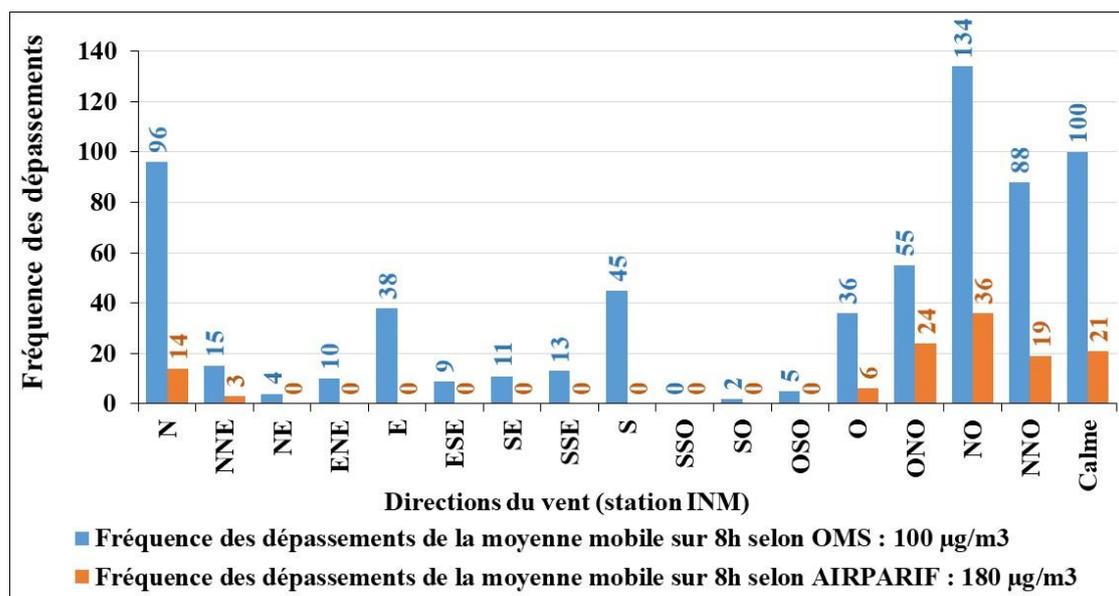
661 cas de dépassement du seuil de 100 µg/ m<sup>3</sup>, en somme pendant le printemps 74% de la totalité des cas de la saison photochimique (Fig. 7.18).



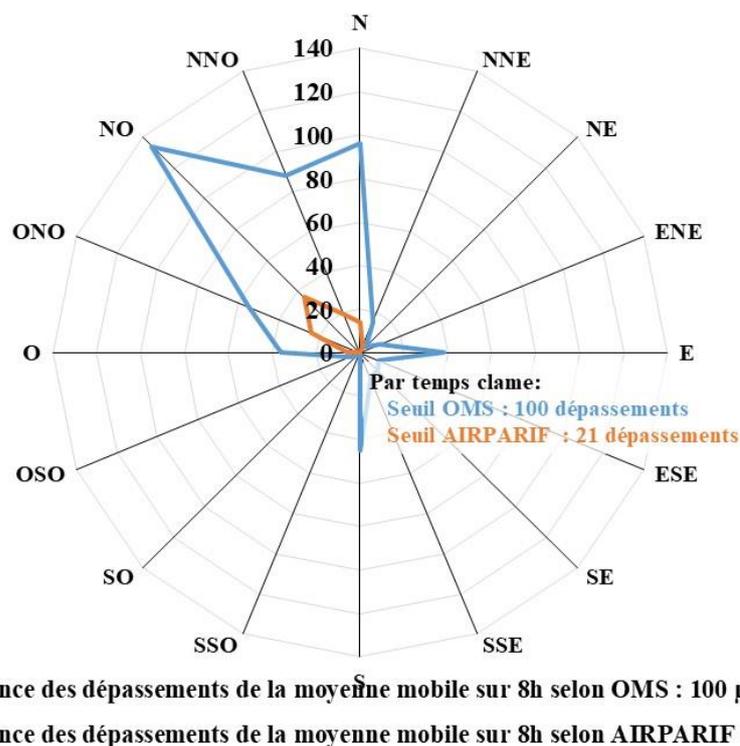
**Figure 7. 18. Fréquence des dépassements de la moyenne mobile aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par mois (la saison photochimique est encadrée en vert)**  
(Données ANPE, année 2011)

### 1.3.4- Etude fréquentielle des nombres de dépassements des seuils de pollution par l’ozone par direction du vent

C’est avec des vents venant des secteurs compris entre l’ouest et le nord, avec un degré moindre par situations de calme, qu’on a le nombre le plus importants des cas de dépassement du seuil de l’OMS : 75% des cas (Fig. 7.19 et Fig. 7.20).



**Figure 7. 19. Fréquence des dépassements de la moyenne mobile aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par direction du vent pendant la saison photochimique**  
(Données ANPE et INM, année 2011)



**Figure 7. 20. Rose de vent de la fréquence des dépassements de la moyenne mobile aux seuils indiqués par l’OMS et par AIRPARIF par direction du vent pendant la saison photochimique**

(Données ANPE, année 2011)

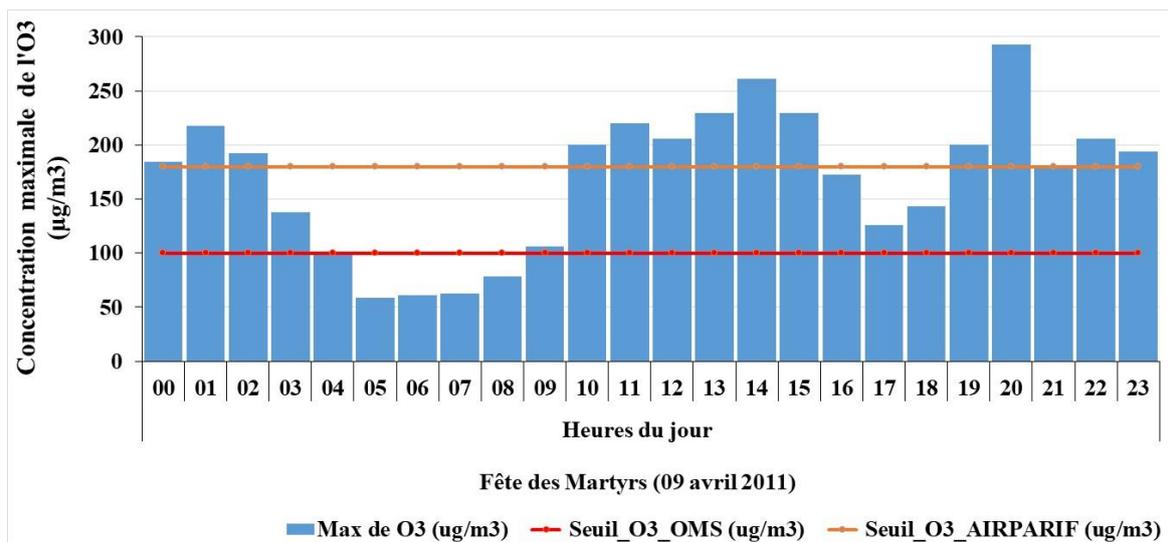
En dehors de la saison photochimique, ce sont les vents du secteur du nord-ouest (et avec un degré moindre du secteur nord qui accompagnent les rares cas de dépassement.

En considérant le seuil d’AIRPARIF ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et en dehors de la saison photochimique, nous ne relevons pas des dépassements.

D’un nombre total de 661 cas (moyenne sur 8 heures), presque 58 % des cas sont enregistrés pendant des jours ouvrables, 15% pendant des jours demi-ouvrables et 28 % pendant des jours non-ouvrables (qui ne représente qu’environ 15% de l’année). Ce Constat est cohérent avec la bibliographie.

### 1.3.5- Etude fréquentielle des nombres de dépassements des seuils de pollution à l’ozone par jours fériés

A l’échelle des jours fériés, il est à noter que pour le cas de la fête des Martyrs, le 9 avril (Fig. 7.21), les dépassements, plus que  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sont enregistrés durant 15 h de suite (ce qui devra avoir un impact très négatif sur la santé surtout que ça coïncide avec la saison d’apparition des maladies pulmonaires et de certaines allergies).



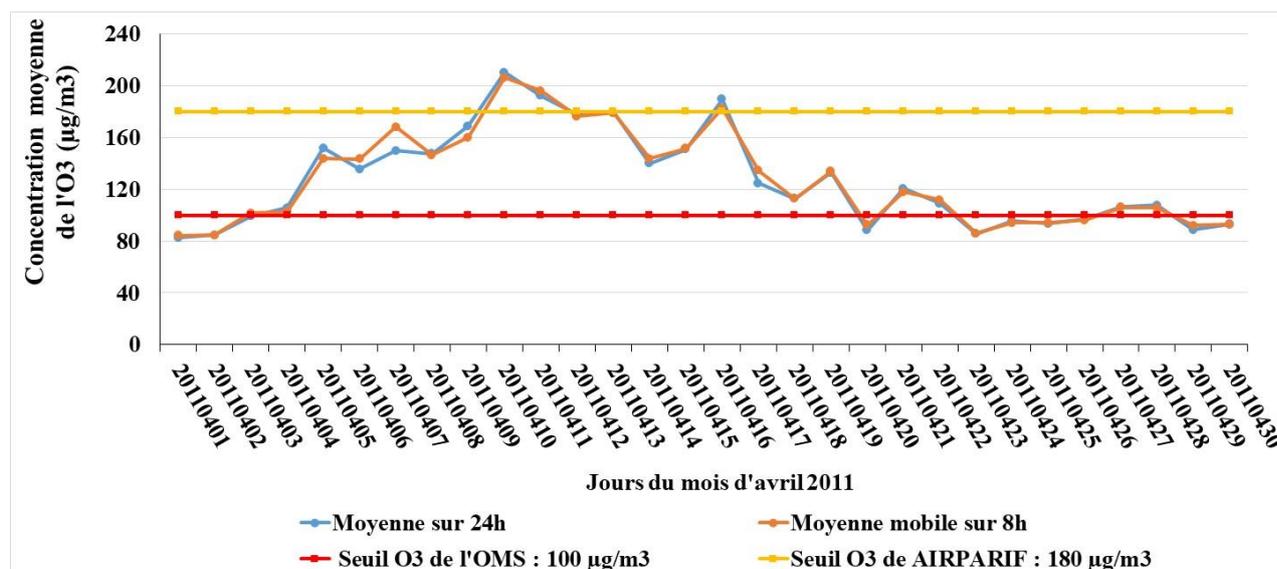
**Figure 7. 21. Répartition quotidienne des concentrations maximales de l’ozone troposphérique pour le 09 avril 2011**

(Données ANPE, année 2011)

#### 1.4- Concentration d’ozone et variables météorologiques :

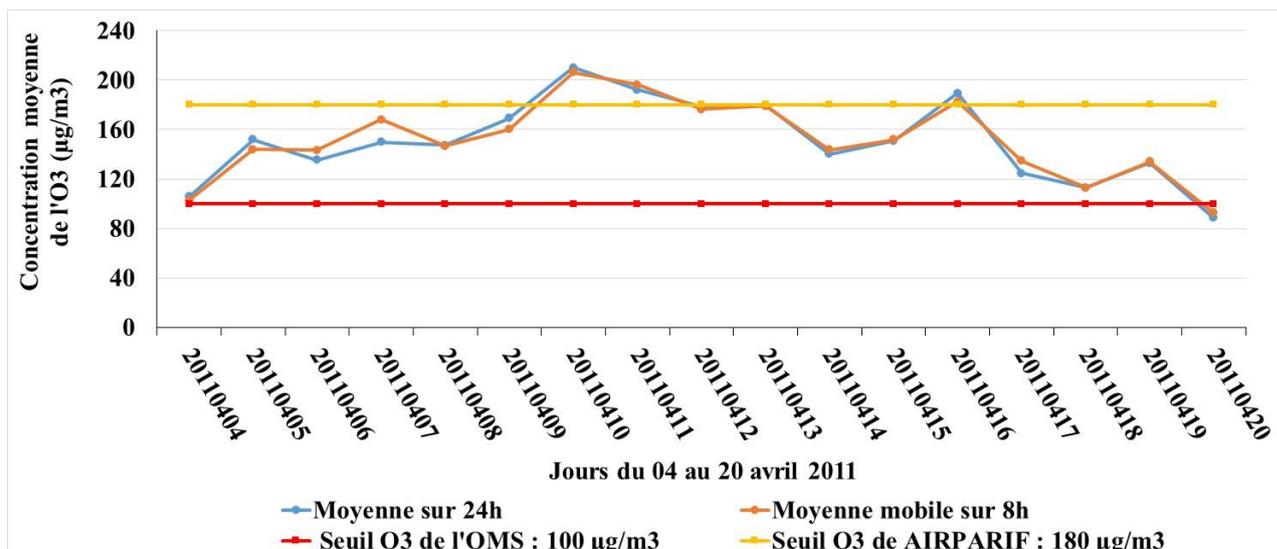
Dans ce qui suit, on va mettre en exergue la relation de la concentration d’ozone troposphérique avec, essentiellement, la direction et la vitesse du vent.

Comme montré ci avant, le mois d’avril 2011 s’individualise par les plus fortes concentrations d’ozone. En fait, en zoomant sur ce mois, il s’avère que deux dates ont dépassé le seuil d’AIRPARIF (plus haut que celui de l’OMS) : le 10 et le 16 avril 2011 (Fig. 7.22 et Fig. 7.23).



**Figure 7. 22. Détails de la répartition journalière des concentrations de l’ozone troposphérique de tout le mois d’avril 2011**

(Données ANPE, année 2011)



**Figure 7. 23. Détails de la répartition journalière des concentrations de l'ozone troposphérique de la période du 04 au 20 du mois d'avril 2011**

(Données ANPE, année 2011)

Il s'agit pour le cas du 10 avril d'une situation de marais barométrique aux alentours de 1016-1017 hPa, avec une amplitude thermique de 13,5°C. La direction du vent qui accompagne les concentrations d'ozone les plus importantes est du nord-ouest et nord nord-ouest.

Toutefois, la station de l'ANPE se trouvant dans un environnement différent géré par des conditions autres que celles de la station de Sidi Ahmed, bénéficie d'une « *brise de mer, plus fréquente en été, qui se déclenche le matin entre 8 et 9h et se couche le soir vers 21h. Le soir, une faible brise d'amont s'écoule sur le versant oriental de Jbel Ennadhour* ». Cette brise souffle « *des secteurs venant de la mer (les quadrants nord et est) durant la journée et du secteur continental (quadrant ouest et nord-ouest) pendant la nuit* » (Dahech et Charfi, 2017).

La durée diurne des réactions photochimiques de 07h00 et 19h00 se caractérise par une corrélation inverse entre la vitesse du vent et la concentration en ozone. Lorsque la vitesse augmente, la concentration diminue. Ceci est attribué à l'effet de brassage de l'air qui se renouvelle. Les deux jours avant et après ont un comportement pratiquement contraire à celui du 10 avril. Même si la tendance générale de la courbe d'ozone est la même pendant la période diurne des réactions photochimiques, les fortes concentrations d'ozone s'accompagnent par une augmentation de la vitesse du vent. Probablement, ceci peut être expliqué par l'existence d'une source de l'ozone ou de ses précurseurs qui soient apportés par la direction générale du vent qui régnait pendant cette période, à savoir nord-ouest et nord nord-ouest. Ce probable apport (pendant les 09 et 11 avril 2011) est acheminé par une brise de la même direction venant de la mer. La vitesse augmentée du vent (une brise de mer) est expliquée par le fait qu'elle est

canalisée par le couloir topographique qui relie la mer du nord et la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed. Le contraste thermique terre-mer intervient le jour pour créer une condition propice à la brise de mer. La nuit, ce contraste contribue au déclenchement d'une brise de terre.

La période du jour de 06 h à 18 h qui a connu une augmentation de la concentration d'ozone, est accompagnée dans une première par une situation anticyclonique 1019-1020 hPa, marquée par la brise de mer venant du nord.

Pour le cas du 16 avril 2011, la situation est un peu différente. Depuis 6h, la concentration d'ozone est accompagnée par une augmentation de la vitesse du vent jusqu'à 9h où un changement de la relation est observé. Avec un changement de la direction du vent qui devient du secteur nord, l'augmentation de la vitesse s'accompagne par une baisse de la concentration d'ozone.

Quand le vent souffle d'une seule direction, ou presque, la relation devient « normale » : avec des vents de 8 m/s (28-30 km/h), un effet de brassage est exercé et qui explique la baisse de la concentration d'ozone.

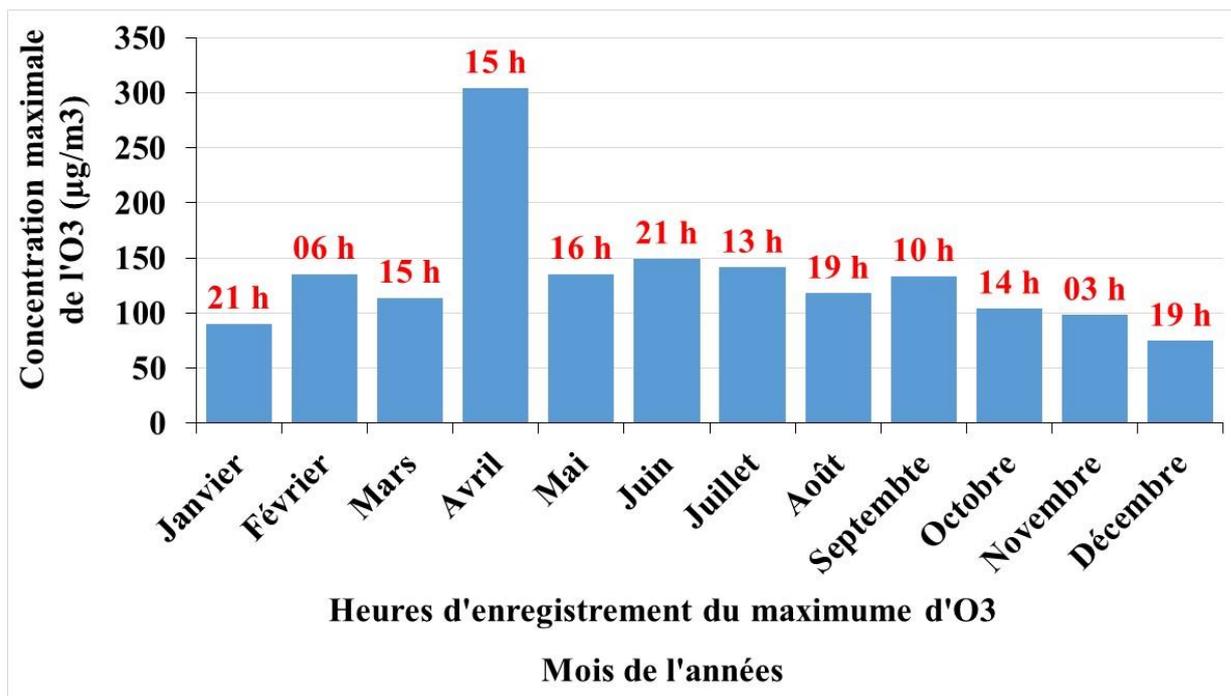
#### **1.5- Fortes concentrations par temps radiatif avec alternance des brises thermiques :**

Dans la station de l'ANPE et durant la saison photochimique, le pic d'ozone est relevé entre 10h et 21h quand la brise de mer est active, notamment avant le coucher du soleil (Fig. 7.24). Les mesures réalisées par Dahech et Charfi (2018) ont montré que « *la circulation de la brise de mer est influencée par le lac, le relief et la ville. A l'aérodrome, elle se lève du lac vers 9 h (en été), avec une vitesse de 3 m/s. La brise de mer y est relevée entre midi et 13 h (7 m/s vers 15 h), alors qu'elle est plus précoce au bord de la mer (vers 8-9 h) où alternent brise de mer, brise de terre et brise d'amont* ».

En hiver, les pics sont enregistrés un peu plutôt le matin, ou un peu plus tard le soir sous l'effet de la brise de terre (vent soufflant de l'ouest et du nord-ouest) réacheminant les panaches d'ozone affrétés le jour par la brise de mer vers l'intérieur ou probablement<sup>34</sup> en raison de la hauteur réduite de la couche limite par temps de brise la nuit (Dahech, 2007). Ainsi des pics peuvent être observés à 19h à 21h et peuvent persister jusqu'à 3h à 6h.

---

<sup>34</sup> On ne dispose pas de mesures verticales pour décider de la hauteur de la couche limite.



**Figure 7. 24. Maximum des concentrations horaires d’ozone troposphérique (année 2011) par mois et par heure d’enregistrement**

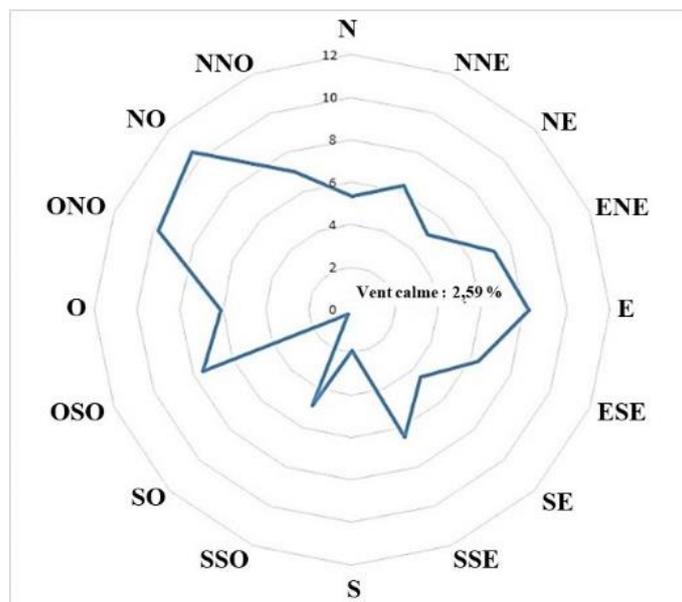
(Données ANPE, année 2011)

## 2- La variabilité spatiale de l’ozone troposphérique

L’aspect spatial de la répartition des concentrations d’ozone troposphérique est basé essentiellement sur les données issues des mesures semi-itinérantes réalisées pendant la période du 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020 et ce sur trois périodes de la journée : le matin de 06h à 07h, l’après-midi de 16h à 18h et le soir de 00h à 01h. Au total, les mesures sont effectuées sur 65 sites, pour un total de 1290 mesures réalisées. Chaque point de mesure a bénéficié d’au moins 6-7 itérations par période de la journée.

Nous avons exploité aussi, les données issues de mesures-semi-itinérantes aux alentours de la Médina de Bizerte et du quartier européen réalisées les 3 et 4 mai 2022.

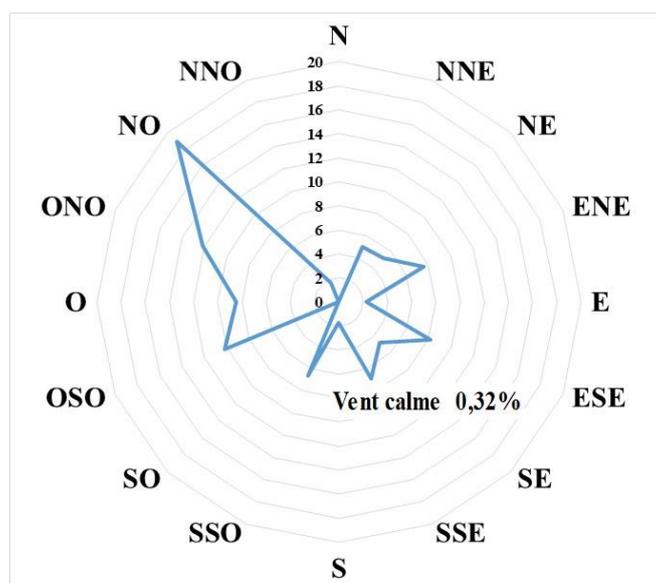
Les analyses de ces données ont montré que plus que 30% des cas de concentrations moyennes de l’ozone troposphérique coïncident avec des vents venant du secteur ouest (Fig. 7.25).



**Figure 7. 25. Concentrations moyennes d’ozone troposphérique par direction du vent, période 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l’été 2020)

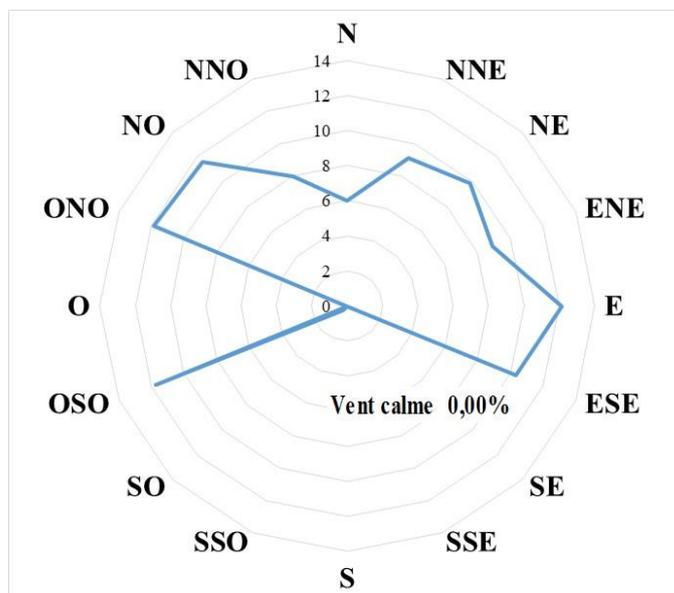
L’impact de la brise sur les directions correspondantes aux concentrations moyennes d’ozone troposphérique apparait plus en scindant la journée en ses trois périodes : Matin, après-midi et soir.

En effet, les résultats obtenus montrent que les directions du vents « préférées » pour la période matinale (entre 06h et 07h) coïncident dans 32% des cas avec des brises d’amont, 27% avec des brises de terre et 40 % avec des vents de la composante est (Fig. 7.26).



**Figure 7. 26. Concentrations moyennes d’ozone troposphérique mesurées pendant la période matinale, période 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l’été 2020)

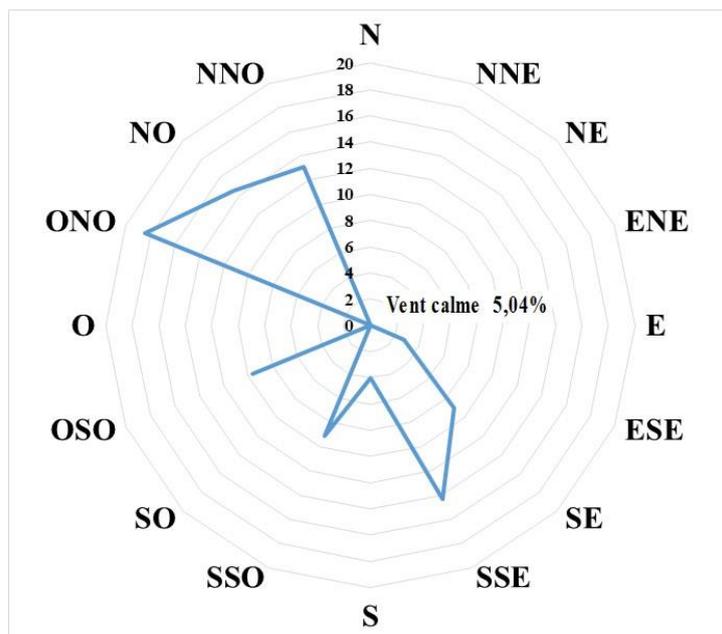
Pendant la période de l'après-midi (entre 16h et 18h), la composante est (brise de mer orientale) prend plus d'ampleur avec 56 % des cas. Les concentrations d'ozone correspondants avec des vents de la composante ouest reste tout de même fréquentes avec 44 % des cas (Fig. 7.27). Ceci peut être attribué à une brise de terre ou d'amont tardive à cause d'un gradient thermique important entre le centre-ville et la surface forestière, au nord-ouest, plus fraîche.



**Figure 7. 27. Concentrations moyennes d'ozone troposphérique mesurées pendant la période de l'après-midi, période 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020**

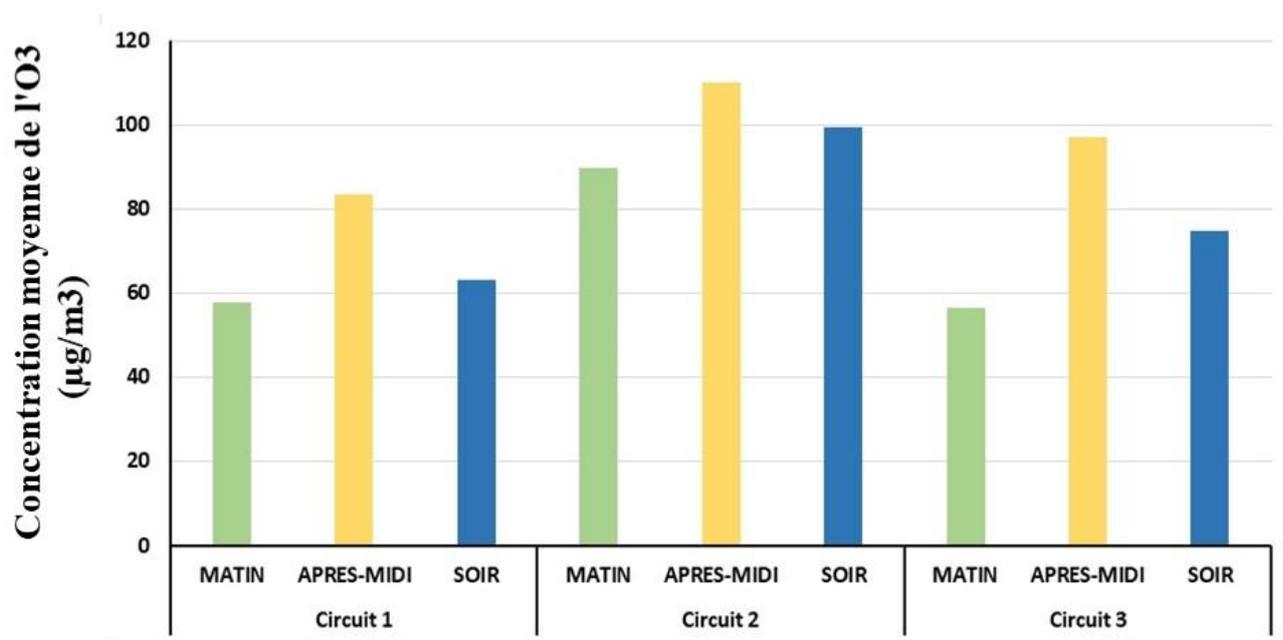
(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l'été 2020)

Pendant la période nocturne (entre 00h et 01h), on observe une reprise des composantes nord-ouest (46 % des cas) et avec un degré moindre le sud et sud-ouest (22 % des cas). La brise de mer tardive (est sud-est à sud sud-est) est encore présente. Elle représente 26 % des cas de concentrations d'ozone enregistrées. Ces concentrations d'ozone sont enregistrées dans 5 % des cas avec des situations de calme (Fig. 7.28).

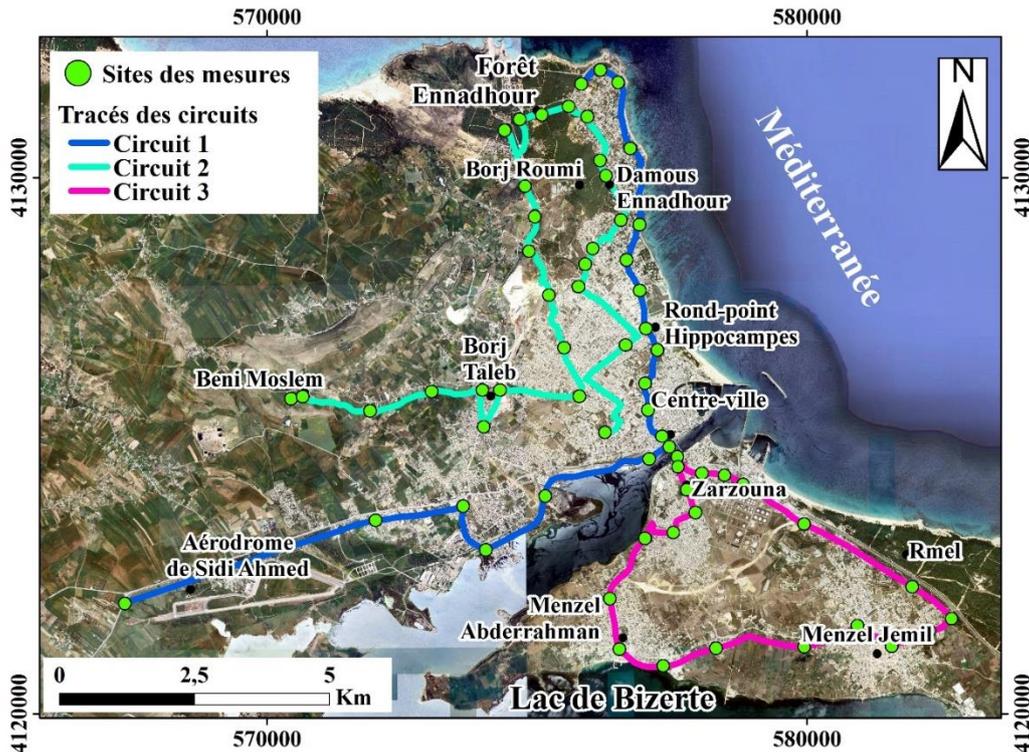


**Figure 7. 28. Concentrations moyennes d’ozone troposphérique mesurées pendant la période nocturne, période 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l’été 2020)

Par circuit, c’est avec le trajet tracé avec le deuxième circuit et pendant l’après-midi qu’on a enregistré les concentrations moyennes les plus importantes (Fig. 7.29 et Fig. 7.30).



**Figure 7. 29. Répartition des moyennes de l’ozone troposphérique par circuit et par période de la journée**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l’été 2020)



**Figure 7. 30. Circuits des mesures semi-itinérantes de l’ozone troposphérique**  
(Google Earth et campagne de mesures semi-itinérantes durant l’été 2020)

Par jour, c’est pendant la période qui s’étale entre 5 et 17 août 2020 qu’on a enregistré des moyennes d’ozone troposphérique plus importantes. Les moyennes journalières pendant cette période dépassent  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Elles sont enregistrées au niveau des points s’exposant vers l’ouest et avec des vents du secteur ouest.

## 2.1- Répartition spatiale des concentrations d’ozone troposphérique à l’échelle de l’agglomération :

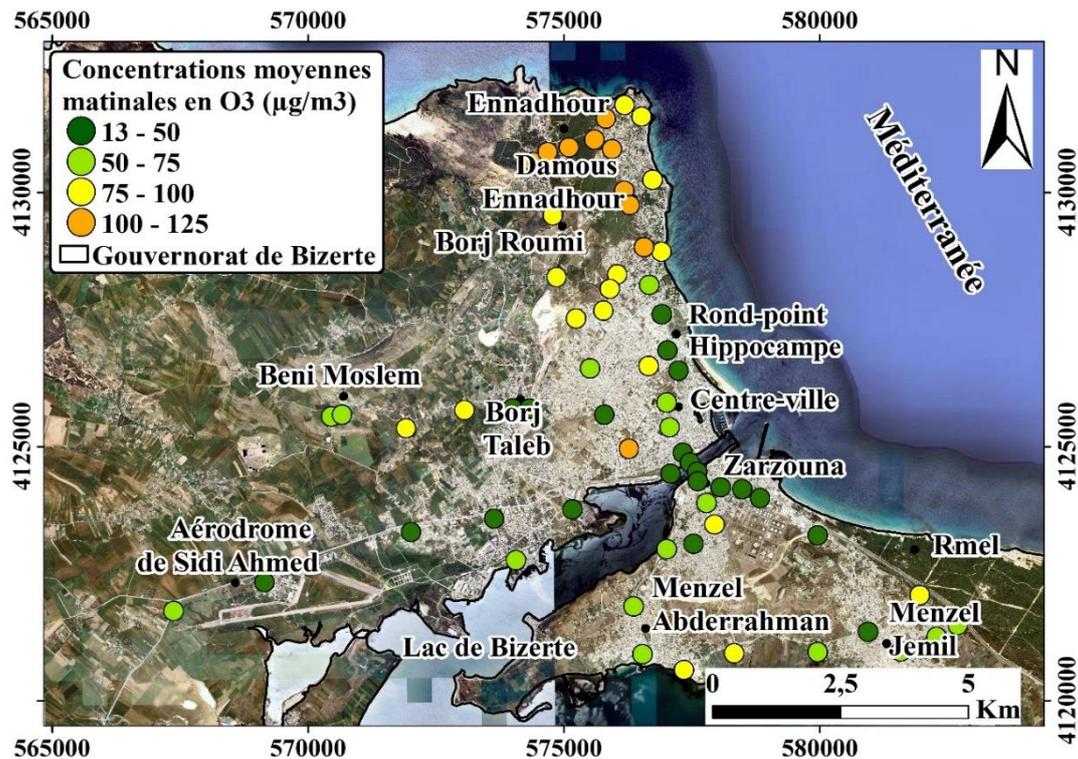
Quatre zones noires dépassant  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sont identifiables : (1) l’une au nord au niveau de la forêt d’Ennadhour et ses environs (surtout limite est contre la mer), (2) l’autre sur la route de Bechateur, entrée est de Béni Moslem, (3) la troisième, à Zarzouna au nord-ouest du STIR et (4) la quatrième à l’entrée sud de Menzel Abderrahman au niveau du complexe universitaire (sur le boulevard du Maghreb Arabe). A noter que les sites (1) et (4) atteignent par la moyenne de l’ozone troposphérique  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 2.1.1- Répartition des concentrations moyennes d’ozone troposphérique le Matin (entre 06h et 07h) :

Deux zones noires dépassant  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sont identifiables : (1) l’une au nord, la plus étendue au niveau de la forêt d’Ennadhour et ses environs (surtout limite est contre la mer), (2) l’autre

sur la route entre la protection civile Bizerte et l'hôpital Habib Bougatfa (Fig. 7.31).

Ceci est dû au cumul de ce polluant dans la forêt d'Ennadhour où en absence d'agents destructeurs enregistre de fortes concentrations. Aussi, à cette heure, par vent venant du secteur nord-ouest de faible vitesse, la brise d'amont (forêt d'Ennadhour) achemine les fortes concentrations conservées dans les zones végétalisées vers le centre-ville et ce en alternance avec la brise de mer (qui ramène l'ozone acheminé vers le large en période nocturne).

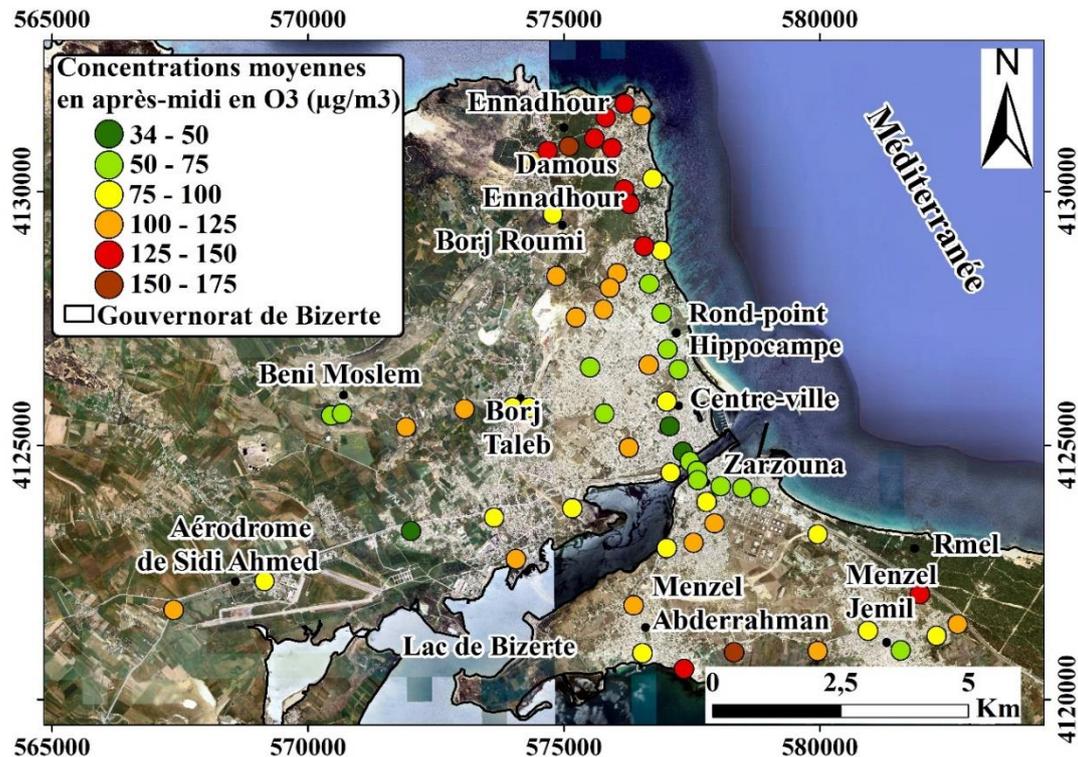


**Figure 7. 31. Répartition spatiale des concentrations moyennes de l'ozone troposphérique le matin**

(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l'été 2020)

### 2.1.2- Répartition des concentrations moyennes d'ozone troposphérique l'après-midi (entre 16h et 18h) :

L'étendu de la zone noire du nord descend un peu au sud vers Aïn Mariem et la moyenne de l'ozone troposphérique augmente par rapport à celle matinale pour atteindre et dépasser  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En plein forêt d'Ennadhour et à l'entrée sud de Menzel Abderrahman au niveau du complexe universitaire (sur le boulevard du Maghreb Arabe), on touche à  $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Fig. 7.32). A cette période de la journée, la brise de mer est très active et contribue à l'acheminement de l'ozone formé en milieu urbain en présence des polluants primaires vers la forêt d'Ennadhour où des pics sont observés entre 18h et 20h en absence d'agent destructeur et car cet espace densément végétalisé dégage des COVs.



**Figure 7. 32. Répartition spatiale des concentrations moyennes de l’ozone troposphérique l’après-midi**

(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l’été 2020)

### 2.1.3- Répartition des concentrations moyennes d’ozone troposphérique le soir (entre 00h et 01h) :

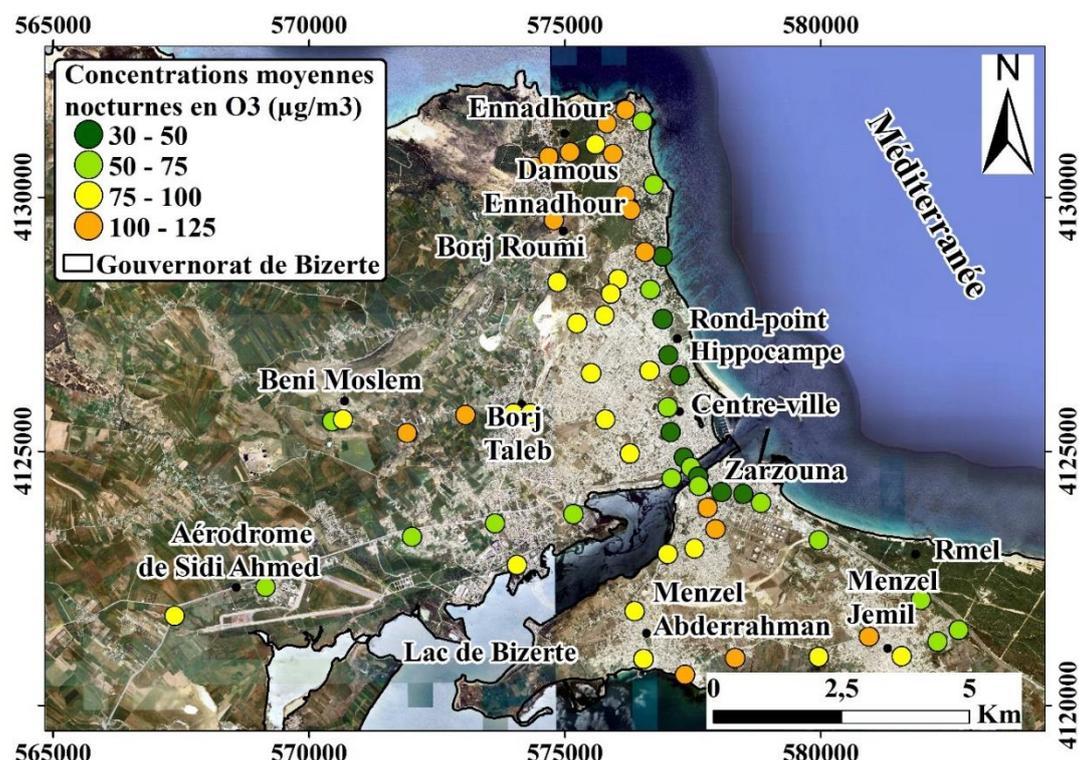
Le soir, cinq zones noires sont identifiées :

- (1) La zone noire du nord conserve sa place de point de vue étendue spatiale et importance de la valeur de la moyenne de l’ozone troposphérique en dépassant dans à peu près plus que 60% des cas  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- (2) la deuxième zone noire s’identifie au niveau de Bechateur, entrée est de Béni Moslem,
- (3) la troisième à Zarzouna au niveau du nord-ouest de STIR
- (4) La quatrième à l’entrée sud de Menzel Abderrahmen
- (5) La cinquième au niveau de Bat’ha Achoura à Menzel Jemil

Cette situation est le résultat du processus d’acheminement, par la brise de mer pendant l’après-midi, de l’ozone vers la forêt Ennadhour et vers l’arrière-pays, tous les deux végétalisés (en présence des COV) à des degrés différents. Un processus qui commencera à être inversé le lendemain matin.

Par opposition, tandis que la forêt d’Ennadhour enregistre des moyennes élevées, celle de Rmel ne dépasse  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  qu’au niveau de deux points (sachant que la distance et l’exposition

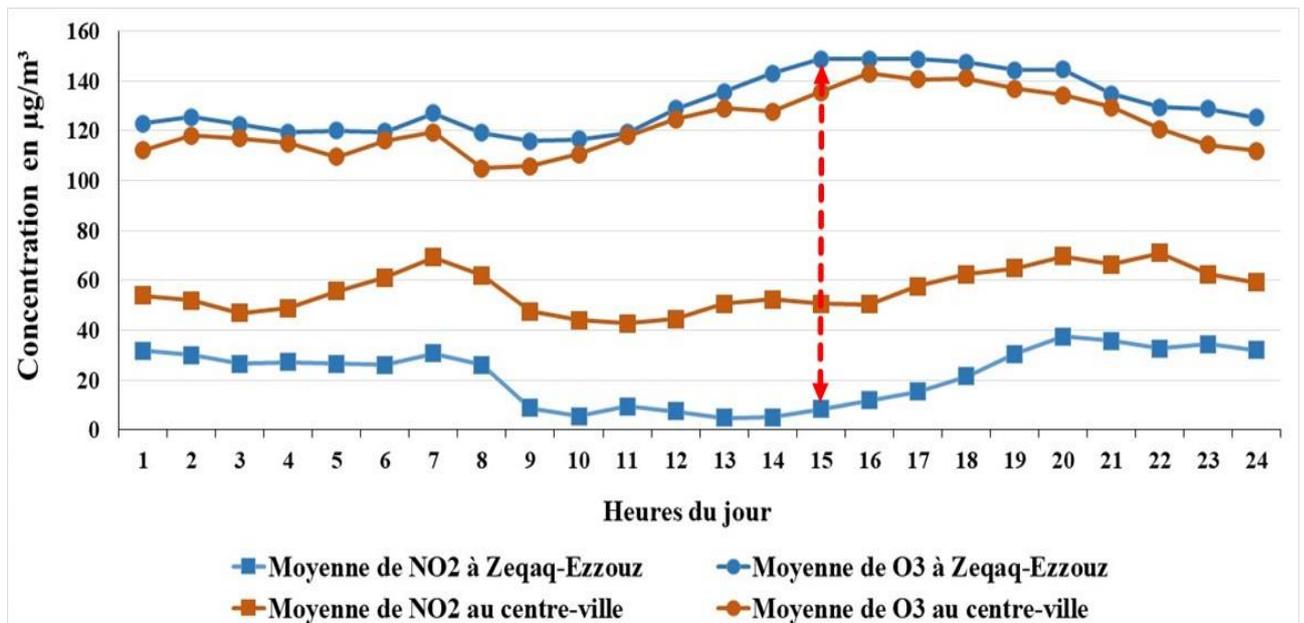
à la mer, ainsi que l'environnement topographique sont différents) (Fig. 7.33).



**Figure 7. 33. Répartition spatiale des concentrations moyennes nocturnes de l’ozone troposphérique**

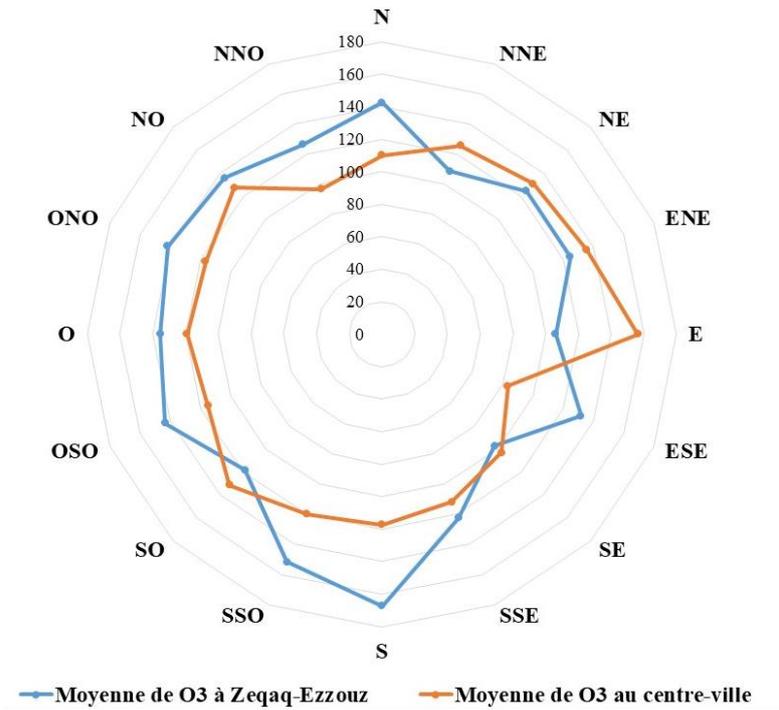
(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l’été 2020)

Les données de la période commune entre les deux kits des capteurs installés ( $\text{NO}_2$  et  $\text{O}_3$ ) au centre-ville et à Zeqaq-Ezzouz (23/08/2021 au 07/09/2021) montrent une relation inversement proportionnelle entre l’ozone et le dioxyde d’azote (Fig. 7.34), notamment au niveau de Zeqaq-Ezzouz. En effet, lorsque le trafic routier (producteur de  $\text{NO}_2$ ) est moins important à Zeqaq-Ezzouz, vers 15h, l’ozone troposphérique enregistre les concentrations les plus importantes. La situation au centre-ville est différente de celle de Zeqaq-Ezzouz. Dans la même période de la journée, le trafic routier au centre-ville est plus important ce qui influence la production de l’ozone. Les réactions chimiques entre les différents gaz présents dans l’air, naturellement ou artificiellement, sont complexes. Certaines sources reportent que « *c’est la photodissociation du dioxyde d’azote ( $\text{NO}_2$ ) qui produit l’atome d’oxygène requis (O), à condition que le monoxyde d’azote (NO) réagisse en priorité avec un radical hydroperoxyde ( $\text{HO}_2$ ) plutôt qu’avec  $\text{O}_3$  ...* » (Origine et sources de pollution, PRE’VAIR, web).

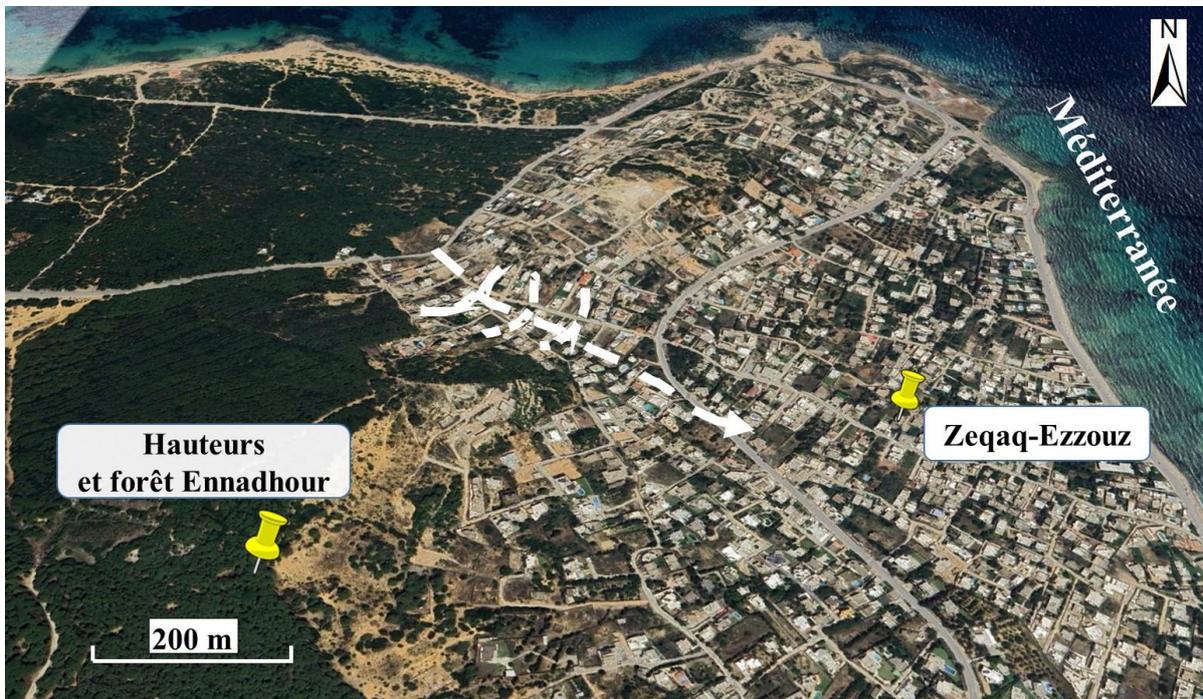


**Figure 7. 34. Répartition quotidienne des concentrations d’ozone troposphérique et du dioxyde d’azote (période du 23/08 au 07/09/2021)**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes durant l’été 2021)

Les analyses montrent que les roses de vents correspondantes aux concentrations moyennes en ozone troposphérique sont globalement les mêmes. La différence réside dans le fait qu’à Zeqaq-Ezzouz les concentrations les plus importantes coïncident avec des vents des composantes sud, ouest et nord de la rose des vents, alors que celles du centre-ville sont plutôt du côté nord-est à est (Fig. 7.35). Ceci s’explique par le rôle de la brise de mer orientale dans le remaniement de la pollution en ozone troposphérique vers le centre-ville. Pour Zeqaq-Ezzouz, l’apport de l’ozone troposphérique est favorisé par deux conditions (1) le cumul de ce polluant dans la forêt d’Ennadhour à proximité (vers l’ouest et le nord-ouest) notamment pendant la période de la journée où les agents destructeurs sont peu ou pas présents (2) un couloir topographique (Fig. 7.36), d’une orientation nord-ouest vers sud-est, qui pendant la nuit ou tôt le matin, avec une brise d’amont (avec un dénivelé de 140 m par rapport aux hauteurs de l’ouest) favorise et canalise l’apport de l’ozone troposphérique vers le capteur installé à Zeqaq-Ezzouz.



**Figure 7. 35. Rose des vents correspondant aux concentrations moyennes d’ozone troposphérique par direction du vent (période du 23/08/2021 au 07/09/2021)**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 23/08/2021 au 07/09/2021)



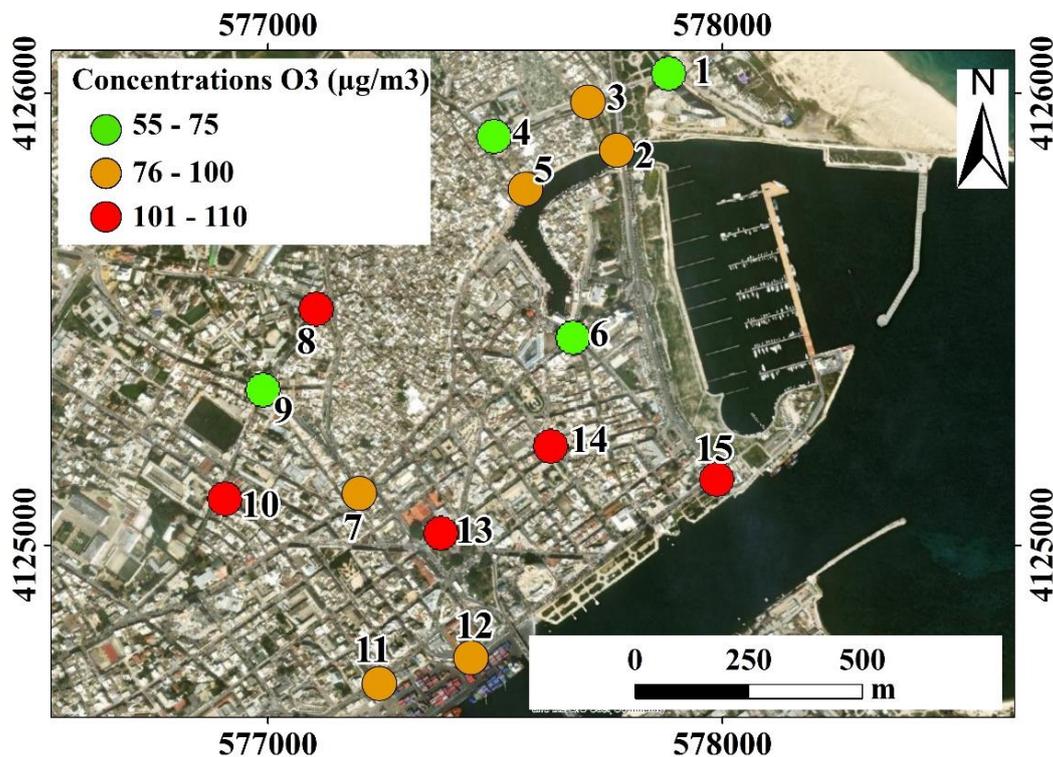
**Figure 7. 36. Position relative du site du capteur de l’ozone troposphérique à Zeqaq-Ezzouz par rapport aux hauteurs d’Ennadhour et le couloir topographique orienté nord-ouest — sud-est**  
(Google Earth)

## 2.2- Répartition des concentrations d’ozone troposphérique à l’échelle du quartier européen à Bizerte :

Au niveau du quartier européen (Fig. 7.37), les points ayant dépassé 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sont au nombre de cinq. Parmi ces points figure le numéro 10 qui se trouve au niveau du lycée Farhat HACHED. Le 03 mai 2022, au niveau du point 13 (Place Foch du côté de la municipalité), la concentration de l’ozone troposphérique était supérieure à 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La température mesurée était de 24,4 °C, l’humidité relative de 66,2% avec une brise de mer (est) de 2 m/s (apportant avec elle les concentrations formées au niveau du point 14 (à quelques mètres de l’école primaire, rue de la Grèce).

Les autres points noirs à proximité du quartier européen sont le point 10 (à côté de l’hôpital militaire de Bizerte), le point 8 (le rond-point du CRDA de Bizerte) et le point 15 à côté du restaurant « Le sport nautique ».

Les quatre coins de la Médina (2, 3, 4 et 5) n’enregistrent pas les mêmes niveaux de concentrations en ozone troposphériques. Celui le plus abrité enregistre un niveau plus bas de pollution en ozone troposphérique.



**Figure 7. 37. Carte des concentrations de l’ozone troposphérique dans le quartier européen à Bizerte (Mesures en début d’après-midi de 12h30 à 13h00)**

(Campagne de mesures en mai 2022)

Aussi, le 2<sup>ème</sup> jour d'Aid Fitr 2022 (03/05/2022), à proximité de la Medina, le trafic routier a été exceptionnellement dense pour une journée non ouvrable à cause de l'installation d'une aire de jeu conçue pour cette fête. La concentration en ozone troposphérique n'a pas atteint 100 µg/m<sup>3</sup>.

Ces différences des concentrations de l'ozone troposphérique dans des sites si proches l'un de l'autre résultent dans :

- Niveau de concentration des destructeurs d'ozone troposphérique sur le site et ses environs : l'apport de l'ozone troposphérique ou de son destructeur peut être d'un site à proximité ou en même orientation que la brise en action (apport au point 13 des concentrations d'ozone troposphérique à partir du point 14 par la brise de mer)
- Position du site (abrité ou non) : Les points 2, 3, 4 et 5 de la Médina (où le point 4 est plus abrité et enregistre des concentrations moins importantes)

Il est à noter que la nature des réactions chimiques entre les différents polluants l'emporte parfois sur l'influence des caractéristiques du site et des paramètres météorologiques. Ces derniers interviennent pour augmenter ou diminuer ces concentrations. Rappelons-le que « *c'est la photodissociation du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) qui produit l'atome d'oxygène requis (O), à condition que le monoxyde d'azote (NO) réagisse en priorité avec un radical hydroperoxyde (HO<sub>2</sub>) plutôt qu'avec O<sub>3</sub> ...* » (Origine et sources de pollution, PRE'VAIR, web).

## **Conclusion**

Pendant la saison photochimique, la variabilité temporelle de l'ozone à l'échelle quotidienne prend une allure assez classique avec un maximum de concentration l'après-midi à cause de la forte insolation et l'intensification de la turbulence atmosphérique, et un minimum en fin de nuit avec la forte stabilité atmosphérique (favorables aux inversions thermiques) et l'amincissement de la couche limite atmosphérique. Outre les facteurs météorologiques et l'environnement topographique du site de mesure, le trafic routier intervient, à travers le NO<sub>x</sub> pour détruire la molécule de l'ozone troposphérique et diminuer ainsi sa concentration dans l'air. L'analyse à l'échelle quotidienne montre que les concentrations d'ozone deviennent parfois critiques par alternance de brises de mer et de terre surtout que l'atmosphère, plus stable au bord de la mer favorise ces fortes concentrations (Chang *et al.*, 2004 ; Martin, 2008).

Par temps radiatif d'été, les mesures semi-itinérantes ont révélé plusieurs zones où des valeurs d'ozone relativement élevées sont occurrence (Sellami *et al.*, 2021).

A Bizerte, des « zones noires » sont identifiées : au nord, au niveau de la forêt d'Ennadhour (Sites 1,2,3), à l'entrée Est de Béni Moslem (Site 4), à Zarzouna au nord-ouest de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR, Site 5), à la cité Belvédère (Site 6) et au niveau du complexe universitaire (à Menzel Abderrahmen, Site 7), qui même avec la moyenne des valeurs enregistrées les après-midi touche à  $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le site qui se trouve entre le siège de la Protection civile, l'hôpital de Habib Bougatfa et l'hôpital militaire de Bizerte (Site 8) a enregistré des pics avoisinant les  $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$  le matin et en fin d'après-midi. Ceci est dû au fait que le matin et par vent venant du secteur nord-ouest de faible vitesse, la brise d'amont (forêt d'Ennadhour) achemine les fortes concentrations conservées dans les zones végétalisées vers le centre-ville et ce en alternance avec la brise de mer (qui ramène l'ozone acheminé vers le large en période nocturne). En fin d'après-midi, la brise de mer est très active et contribue au transport de l'ozone formé en milieu urbain en présence des polluants primaires vers la forêt d'Ennadhour où des pics sont observés entre 18h et 20h en absence d'agent destructeur et car cet espace densément végétalisé dégage des COVs.

Outre la circulation routière (responsable de la destruction de l'ozone) et l'environnement topographique du site qui soit fait véhiculer le polluant, soit le bloque et contribue ainsi à son accumulation et engendre les fortes concentrations), les brises à Bizerte (Terre, mer, amont et de lac) contraignent fortement les niveaux de concentration de ce polluant.

Ces observations sont valables aussi pour une échelle plus fine (le quartier européen). En plus paramètres intervenants à une mésoéchelle (l'agglomération de Bizerte), d'autres éléments interviennent pour définir les niveaux des concentrations des polluants, y compris l'ozone troposphérique : l'orientation par rapport à la brise active, l'encaissement du site par rapport aux immeubles (blocage, canalisation) et à la topographie environnante, ainsi que le degré d'exposition aux sources de pollution en ozone troposphérique, de ses précurseurs et de ses destructeurs

Les « zones noirs » identifiées demandent une attention particulière surtout que certaines d'entre-elles se trouvent dans des endroits pratiqués pour le bien-être qu'elles offrent (Forêt, bord de la mer, voisinage de l'hôpital).

## **CHAPITRE 8**

# **MODELISATION DE LA POLLUTION PHOTOCHEMIQUE : CAS DE L'OZONE TROPOSPHERIQUE**

La modélisation de la pollution atmosphérique urbaine a pour objectif de comprendre la variabilité spatiale des polluants et leurs niveaux de concentrations. Certains polluants ont des temps de vie long et peuvent rester plusieurs semaines dans l'atmosphère (PM<sub>2,5</sub>) et donc être transportés sur de longues distances, d'autres au contraire, sont plus locaux (NO<sub>x</sub> en proximité du trafic, O<sub>3</sub>). La répartition spatiale d'un polluant dépend de plusieurs facteurs et notamment des surfaces rencontrées. La qualité de l'air, elle, est fortement conditionnée par la situation météorologique, la topographie, la morphologie urbaine et des sources d'émissions (Thouron, 2017).

Une faible densité des stations de mesure des polluants emmène les chercheurs à avoir recours à la modélisation statistique fondée sur les mesures de terrain et à la modélisation physique qui utilise les équations traduisant les interactions qui commandent la concentration ou la dispersion des polluants. L'objectif est de reconstruire la distribution spatiale du polluant étudié dans une zone géographique connaissant la mesure de concentration de polluants à certains points. Les méthodes d'interpolation et d'extrapolation statistiques sont variées. Certains travaux recommandent le krigeage (Frangi *et al.* 1996 ; Carletti *et al.* 2000), d'autres recherchent et calculent de manière empirique des variables explicatives du phénomène afin de mettre en place des guides d'interpolation (Jeanne, 2003).

Le principal problème dans ces méthodes faisant appel à l'interpolation/extrapolation concerne le manque de données de mesures fournies par les réseaux d'observation de la qualité de l'air. Les résultats sont dépendants du nombre et de la répartition spatiale des mesures, ainsi que de la méthode d'interpolation (Basly, 2000). Ce problème peut être résolu partiellement en ayant recours à des campagnes de mesures ponctuelles itinérantes.

Les modèles physiques représentent un outil de compréhension, d'analyse et dans certains cas de prévision. Il existe un grand nombre de modèles de transports et transformations d'éléments dans l'atmosphère. Ces modèles se distinguent sur la base des échelles spatiales et temporelles considérées mais aussi suivant les équations de transport appliquées. Dans le domaine de la qualité de l'air, il devient possible de modéliser l'évolution physico-chimique des polluants, leur émission, leur transport, leur diffusion, leur dépôt et transformation chimique (Giambanis *et al.*, 1998 ; Leuzzi et Monti, 1998 ; Salles *et al.* 1996). Plusieurs modèles sont aujourd'hui utilisés par les experts travaillant dans le domaine de la qualité de l'air (Maneux, 2001). Ils permettent d'accéder à une estimation des concentrations des polluants atmosphériques dans l'espace et dans le temps. Une description détaillée de tous ces modèles peut être trouvée dans le rapport du European Topic Center on Air Quality, 'Ambient Air Quality' (Moussiopoulos *et al.* 1996).

Dans cette étude, nous avons recours à la modélisation statistique. Le but est de bâtir un modèle d'interpolation fonctionnel permettant d'estimer, à partir des mesures ponctuelles, la répartition spatiale de l'ozone troposphérique en fonction de la période de la journée (matin, après-midi et soir) vu que ce polluant photochimique est très corrélé à l'intensité du rayonnement solaire et à l'existence de ses précurseurs et de ses destructeurs (Martin, 2008 ; Charfi et Dahech, 2015).

## **1- Données exploitées**

### **1.1. Les mesures de pollution et météorologiques**

Il s'agit des données de mesures semi-itinérantes durant l'été 2020 que nous avons enrichie avec des données météorologiques. En détail nous avons exploité :

- Des mesures semi-itinérantes d'ozone : Afin d'augmenter la résolution spatiale des données et de mettre en exergue la variabilité spatiale des concentrations d'ozone, nous avons recouru à des mesures mobiles par un capteur Aéroqual 500<sup>35</sup> effectuées du 22 au 30 juillet 2020 et du 05 au 17 août 2020 et ce sur trois périodes de la journée : le matin de 06h à 07h, l'après-midi de 16h à 18h et le soir de 00h à 01h. L'idée est de cerner l'impact des différentes brises, très actives dans la zone d'étude. Il s'agit des brises de mer et des brises de terre, de la brise d'amont (venant des hauteurs d'Ennadhour) et du lac (Dahech et Charfi, 2017). Au total, les mesures sont effectuées sur 65 sites, pour un total de 1290 mesures réalisées. Chaque point de mesure a bénéficié d'au moins 6-7 itérations par période de la journée (Fig. 7.30).
- Des données météorologiques : Il s'agit des enregistrements horaires de la température, l'humidité, la direction et la vitesse du vent et de la pression atmosphérique au niveau de la mer. Elles sont enregistrées par la station météorologique de l'Institut National Météorologique (INM) installée à l'aérodrome de Sidi Ahmed. Aussi nous avons exploité les données issues la station automatique DAVIS que nous avons installée au centre-ville de Bizerte pour fournir des données à un pas de temps de 30 minutes. Les variables météorologiques intégrées dans la comparaison des différentes méthodes de régression sont au nombre de six. Il s'agit en détail de :

---

<sup>35</sup> Les enregistrements du capteur Aéroqual 500 sont comparables à ceux des stations fixes de référence relevés à Edinburgh, Royaume-Uni, (Lin, 2015)

- La température (°C)
- La température du point de rosée (°C)
- L'humidité relative (%)
- La vitesse du vent (m/s)
- La direction du vent (°)
- La pression atmosphérique au niveau de la mer (hPa)

## 1.2. Les mesures liées au trafic

Il s'agit des données sur la typologie du trafic routier. (Nombres des gros engins, de voitures et de motos) par voie routière. Elles sont en mesure de nous renseigner sur l'importance des gaz destructeurs de l'ozone, (notamment le monoxyde d'azote qui détruit l'ozone dès que la concentration de ce gaz émis par les véhicules à combustion dépasse quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Nous avons intégré dans le modèle les trois variables suivantes relatives au trafic routier :

- Nombre des gros engins (Camions, bus, tracteur)
- Nombre des voitures
- Nombre des motos

## 1.3. Les images satellites

Diverses informations peuvent être extraites des données satellitaires en vue de leur utilisation dans le domaine de la qualité de l'air. On peut citer comme exemple : le réseau routier, l'occupation du sol, la rugosité et la topographie. Pour cette raison un modèle numérique de terrain a été utilisé. Il provient du serveur de données de la NASA Global Land Cover Facility (GLCF), téléchargé gratuitement du site Internet <http://srtm.csi.cgiar.org>. Il propose des données RADAR obtenues par interférométrie lors de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) présentant une précision horizontale de 30m et verticale de 1m. Dans ce contexte, il est édifiant de souligner qu'en plus de l'altitude, d'autres paramètres topographiques interviennent pour définir les zones de concentration, de dépôt, de transport et de brassage. Il s'agit de la pente, l'exposition (orientation des versants), la distance à la mer, la rugosité de surface et l'encaissement relatif (Martin et Adnès, 2014). En effet, les polluants primaires ou secondaires sont dépendants de l'influence de la topographie sur les conditions aérologiques (Martin et Adnès, 2014). La résolution assez fine permettrait de nuancer la micro-échelle et de voir les zones qui vont jouer les différents rôles : de canalisation de l'air qui va s'exprimer par le transport/orientation/dispersion de l'ozone et de blocage et concentration de

l'ozone. Dans notre cas, nous avons injecté dans le modèle les trois variables topographiques suivantes :

- Élévation (m) (SRTM 30m)
- L'exposition (°) (SRTM 30m)
- Distance par rapport à la mer (calculée avec le logiciel QGIS en utilisant l'extension NNJoin)

Les différents types de données sont intégrées dans des systèmes d'information géographique (SIG).

Suivant l'échelle considérée, ces différentes caractéristiques de l'environnement des points d'observations seront utilisées comme variables explicatives de la variabilité spatiale de la concentration de l'ozone troposphérique.

## **2. Modélisation de la variabilité spatiale des concentrations d'ozone troposphérique à Bizerte**

### **2.1. Choix du modèle de la régression**

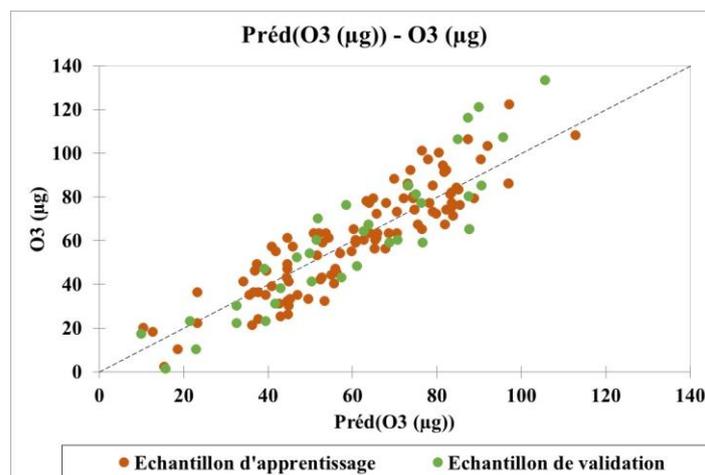
Dans la littérature, plusieurs types de régressions ont été utilisés pour simuler l'agencement spatiale de la pollution par l'ozone en milieu urbain. Certains auteurs évoquent la régression du moindre carré comme la PLS (Partial Least Square). D'autres utilisent la régression Lasso, tandis que d'autres exploitent la régression ElasticNet (Maumy-Bertrand, 2020 ; Pandya *et al.*, 2020). Conscient de l'importance du modèle qui convient le mieux avec nos données de l'ozone troposphérique de l'été 2020 à Bizerte, nous avons pris le choix de comparer plusieurs régressions et de ne retenir que celle qui donne les meilleurs résultats : un coefficient de détermination le plus important et des indices sur les erreurs les plus faibles (y compris la racine de la moyenne des carrés des erreurs (RMCE) et degré de liberté (DDL)).

Les régressions comparées sont : la régression linéaire, PLS, Lasso, Elastic Net et Ridge.

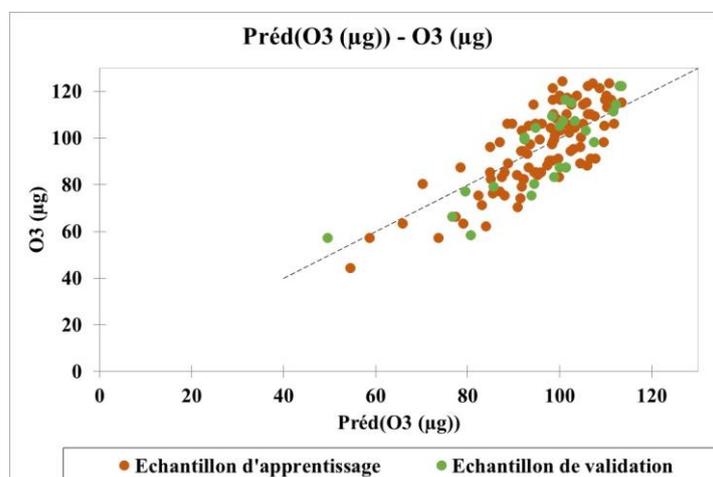
Un deuxième niveau de comparaison de l'efficacité des modèles est de les appliquer :

- Sur toutes les données sans distinction
- Sur toutes les données sans distinction avec élimination des observations qui ont enregistré des résidus importants
- Sur toutes les données et par période de la journée (matin, après-midi et soir)

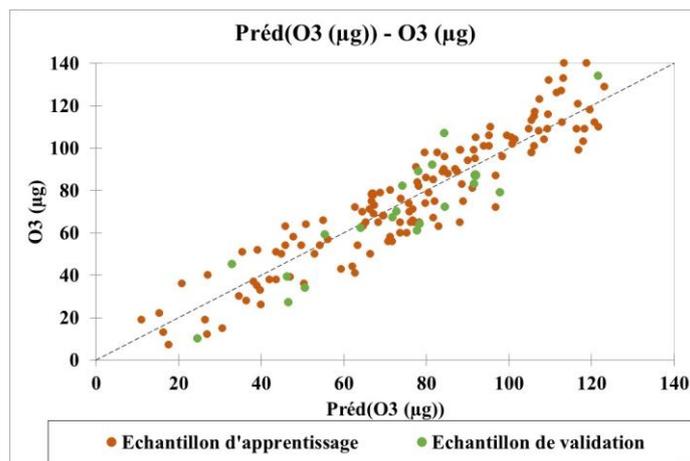
- Sur toutes les données et par période de la journée (matin, après-midi et soir) avec élimination des observations qui ont enregistré des résidus importants
- Réserver un échantillon de validation de 25% des observations avec une bonne répartition par rapport à l'ensemble des données utilisées (Fig. 8.1 – Fig. 8.3)



**Figure 8. 1. Echantillons d'apprentissage et échantillons de validation du modèle avec la régression Ridge pour la période matinale**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)



**Figure 8. 2. Echantillons d'apprentissage et échantillons de validation du modèle avec la régression Ridge pour la période de l'après-midi**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)



**Figure 8. 3. Echantillons d'apprentissage et échantillons de validation du modèle avec la régression Ridge pour la période nocturne**

(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

Il est à noter que quel que soit la régression choisie, la simulation qui va en découler ne prend pas en compte les déplacements des panaches. Aussi, le modèle choisi et sa configuration ne seront applicables qu'en saison chaude dans une configuration d'occupation de sol, de topoclimatologie et de caractéristiques socio-économiques semblables à celles de l'agglomération de Bizerte. Après avoir comparé les résultats obtenus, la régression Ridge a été sélectionnée pour avoir donné les meilleurs indicateurs de qualité du modèle. Par période de la journée, le degré de liberté n'a pas dépassé les 2,79%. La racine de la moyenne des carrés des erreurs (RMCE en anglais « Root Mean Square Error, RMSE) est entre 10 à 11 indiquant que l'écart moyen entre la valeur de l'ozone troposphérique simulée et celle mesurée est entre 10 à 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Quant au coefficient de détermination, il est à peu près 0,6 pour la formule de la régression de l'après-midi. Il est 0,8 pour le matin et 0,87 pour le soir indiquant que les variables prédictives du modèle sont capables d'expliquer 80%, 60% et 87% de la variation de l'ozone troposphérique respectivement pour le matin, l'après-midi et le soir. Le choix de cette méthode est basé aussi sur le fait qu'elle a donné les indices des erreurs les plus faibles. Ces indicateurs de qualité du modèle avant l'élimination des observations responsables des valeurs importantes des résidus étaient comme suit :

- La période matinale :  $R^2 = 0,34$  et  $\text{RMCE} = 42,462$
- La période de l'après-midi :  $R^2 = 0,124$  et  $\text{RMCE} = 43,035$
- La période nocturne :  $R^2 = 0,475$  et  $\text{RMCE} = 35,194$

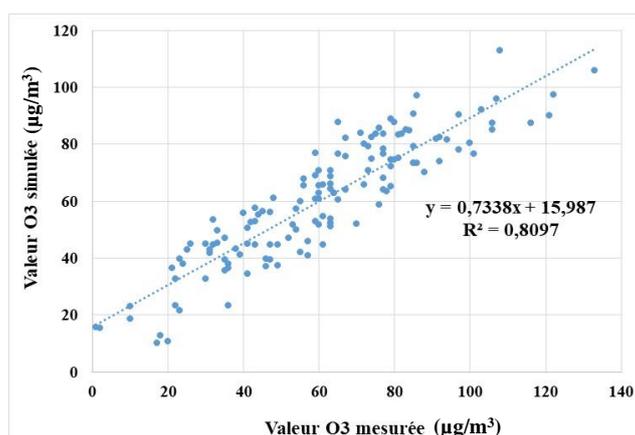
La régression Ridge conserve l'ensemble des variables prédictives dans l'ajustement du modèle et limite ainsi la variance des prévisions (Kazadi et Kamingu, 2022).

Grâce au réseau très dense constitué de 65 sites (pour un total de 1290 mesures réalisées) assez bien répartis dans l'espace, un modèle statistique a été établi donnant des résultats satisfaisants (Tab. 8.1 – Tab. 8.3, Fig. 8.4 – Fig. 8.6).

**Tableau 8. 1. Paramètres et qualité du modèle avec la régression Ridge avec les données de la campagne matinale de mesure des concentrations d’ozone troposphérique**

(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

Paramètres du modèle (O3 (µg)) : Régression Ridge	
Matin	
Variable	Coefficient
Nbre cam/Bus/Tracteur	-1,37
Nbre Voit	-1,19
Nbre Moto	-4,27
SRTM_Elevation	0,23
Distance_Mer	0,0008
Temp	-1,20
Hum	0,68
PR	1,24
Vit_Vent	3,1
Dir_Vent	0,12
Pression_hPa	0,97
SRTM_30_Aspect	0,04
Constante	-938,1
<b>Moyenne O3 mesuré</b>	<b>60,74</b>
<b>Moyenne O3 calculé</b>	<b>60,77</b>
Indicateurs de qualité	
Observations	430
<b>DDL</b>	<b>12 (2,79 %)</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,80</b>
MCE	115,242
RMCE	10,735



**Figure 8. 4. Croisement des valeurs mesurées et celles simulées de la campagne matinale de mesure des concentrations d’ozone troposphérique**

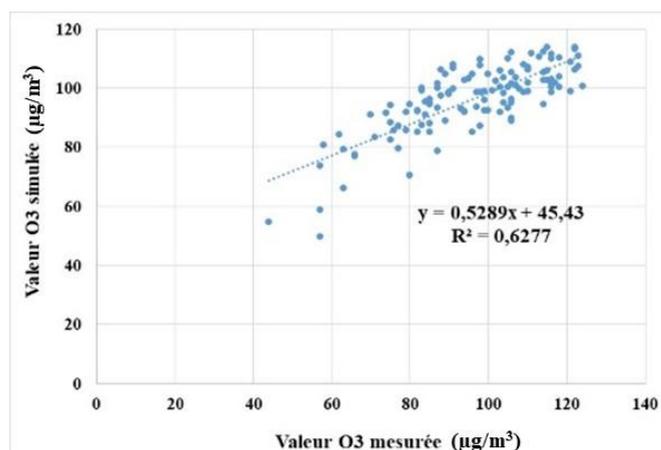
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

La formule produite par la régression Ridge pour simuler la concentration de l’ozone troposphérique le matin à Bizerte est la suivante :

Concentration d'ozone ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) =  $-938,1 + (\text{Temp} \times -1,2) + (\text{Hum} \times 0,68) + (\text{PR} \times 1,24) + (\text{Vit\_Vent} \times 3,1) + (\text{Dir\_Vent} \times 0,12) + (\text{Pression\_hPa} \times 0,97) + (\text{SRTM\_30\_Aspect} \times 0,04) + (\text{SRTM\_Elevation} \times 0,23) + (\text{Distance\_Mer} \times 0,0008) + (\text{Nbre cam/Bus/Tracteur} \times -1,37) + (\text{Nbre Voit} \times -1,19) + (\text{Nbre Moto} \times -4,27)$

**Tableau 8. 2. Paramètres et qualité du modèle avec la régression Ridge avec les données de la campagne de l'après-midi de mesure des concentrations d'ozone troposphérique**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

Paramètres du modèle (O3 ( $\mu\text{g}$ )) : Régression Ridge	
Après-midi	
Variable	Coefficient
Nbre cam/Bus/Tracteur	-1,48
Nbre Voit	-0,31
Nbre Moto	-1,91
SRTM_Elevation	0,057
Distance_Mer	0,001
Temp	0,5
Hum	-0,03
PR	0,7
Vit_Vent	-2,64
Dir_Vent	-0,0048
Pression_hPa	-0,55
SRTM_30_Aspect	0,0037
Constante	636,83
<b>Moyenne O3 mesuré</b>	<b>96</b>
<b>Moyenne O3 calculé</b>	<b>96</b>
Indicateurs de qualité	
Observations	430
<b>DDL</b>	<b>12 (2,79 %)</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,60</b>
MCE	121,070
RMCE	11,003



**Figure 8. 5. Croisement des valeurs mesurées et celles simulées avec les données de la campagne de l'après-midi de mesure des concentrations d'ozone troposphérique**

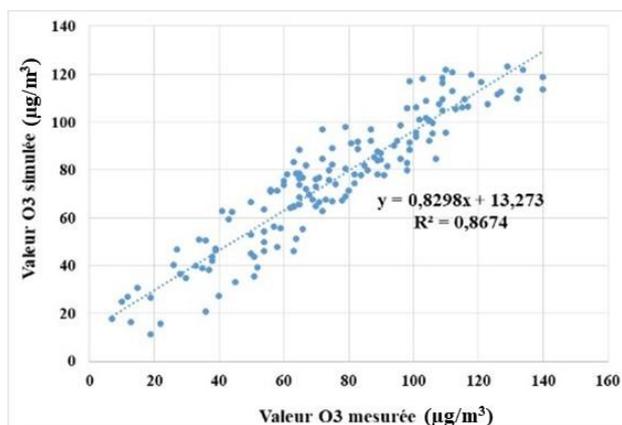
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

La formule produite par la régression Ridge pour simuler la concentration de l’ozone troposphérique l’après-midi à Bizerte est la suivante :

$$\text{Concentration d'ozone } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = 636,83 + (\text{Temp} \times 0,5) + (\text{Hum} \times -0,03) + (\text{PR} \times 0,7) + (\text{Vit\_Vent} \times -2,64) + (\text{Dir\_Vent} \times -0,0048) + (\text{Pression\_hPa} \times -0,55) + (\text{SRTM\_30\_Aspect} \times 0,0037) + (\text{SRTM\_Elevation} \times 0,057) + (\text{Distance\_Mer} \times 0,001) + (\text{Nbre cam/Bus/Tracteur} \times -1,48) + (\text{Nbre Voit} \times -0,31) + (\text{Nbre Moto} \times -1,91)$$

**Tableau 8. 3. Paramètres et qualité du modèle avec la régression Ridge avec les données de la campagne nocturne de mesure des concentrations d’ozone troposphérique**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

Paramètres du modèle (O3 (µg)) : Régression Ridge	
Soir	
Variable	Coefficient
Nbre cam/Bus/Tracteur	-5,35
Nbre Voit	-2,26
Nbre Moto	-2,07
SRTM_Elevation	0,092
Distance_Mer	0,0009
Temp	-4,89
Hum	0,95
PR	-0,26
Vit_Vent	-0,85
Dir_Vent	0,095
Pression_hPa	1,05
SRTM_30_Aspect	0,032
Constante	-934,67
<b>Moyenne O3 mesuré</b>	<b>75</b>
<b>Moyenne O3 calculé</b>	<b>76</b>
Indicateurs de qualité	
Observations	430
<b>DDL</b>	<b>12 (2,79 %)</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,87</b>
MCE	115,131
RMCE	10,730



**Figure 8. 6. Croisement des valeurs mesurées et celles simulées avec les données de la campagne nocturne de mesure des concentrations d’ozone troposphérique**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

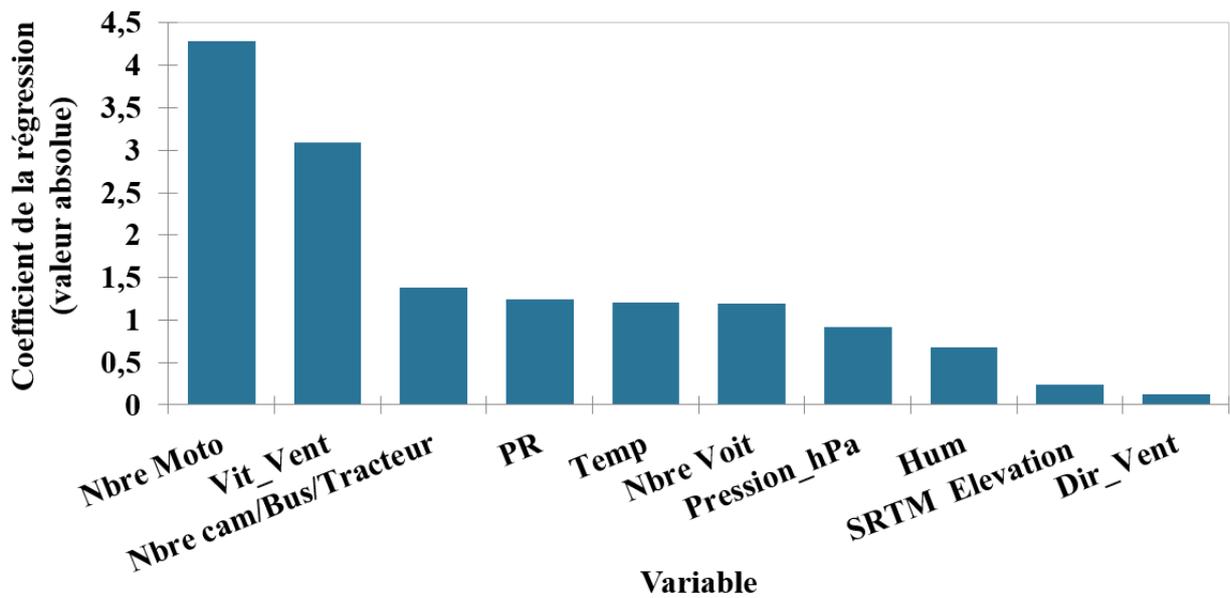
La formule produite par la régression Ridge pour simuler la concentration de l'ozone troposphérique le soir à Bizerte est la suivante :

$$\text{Concentration d'ozone } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = -934,67 + (\text{Temp} \times -4,89) + (\text{Hum} \times 0,95) + (\text{PR} \times -0,26) + (\text{Vit\_Vent} \times -0,85) + (\text{Dir\_Vent} \times 0,095) + (\text{Pression\_hPa} \times 1,05) + (\text{SRTM\_30\_Aspect} \times 0,032) + (\text{SRTM\_Elevation} \times 0,092) + (\text{Distance\_Mer} \times 0,0009) + (\text{Nbre cam/Bus/Tracteur} \times -5,35) + (\text{Nbre Voit} \times -2,26) + (\text{Nbre Moto} \times -2,07)$$

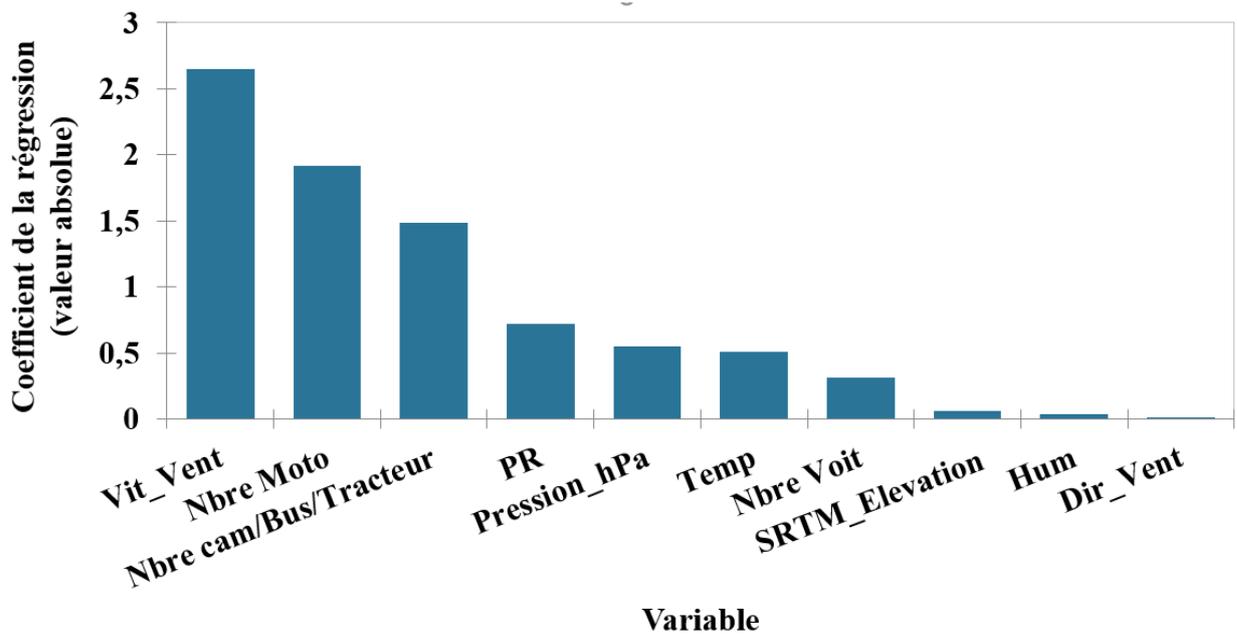
Ainsi, ces tableaux sont convertis en formules et appliquées aux données de base. A l'issue du modèle, les moyennes des valeurs de l'ozone troposphérique mesurées, comparées à celles calculées sont proches voire même égales. Globalement, l'écart entre valeur mesurée et valeur estimée oscille entre  $-30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $+30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Les droites de régression résument respectivement pour le matin, l'après-midi et le soir 80 %, 60 % et 87 % des nuages de points résultants des croisements entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées à partir du modèle. Ce dernier est performant le matin et la nuit en raison de la forte corrélation inverse entre la concentration d'ozone troposphérique et le nombre des moyens de circulation à combustion (à travers leurs dégagements) d'une part, et avec la vitesse du vent (par effet de balayage) d'autre part.

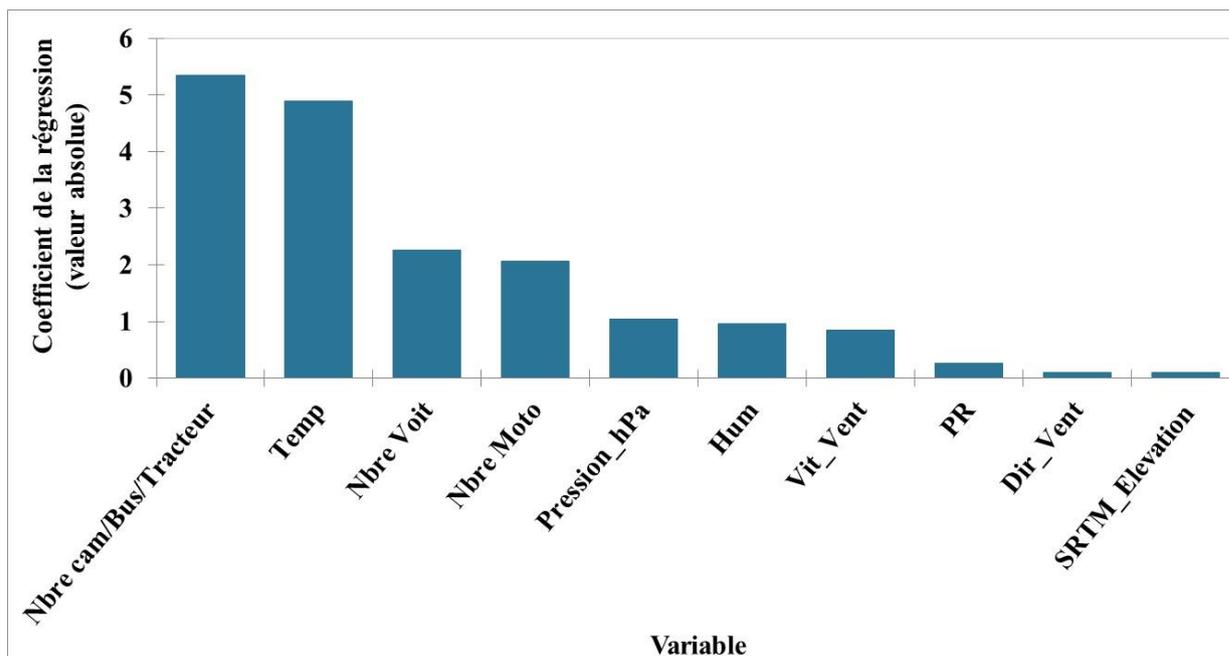
L'influence des variables dans la prédiction de l'ozone troposphérique n'a pas le même degré d'importance pendant les trois périodes de mesures (Fig. 8.7 – Fig. 8.9). En effet, le nombre des motocycles, des gros engins (camions, bus, tracteurs) et la vitesse du vent ont figuré parmi les trois variables les plus influentes dans le modèle le matin et l'après-midi. Le soir, il n'y a que les gros engins qui ont gardé leur rang d'importance et la température et le nombre des voitures qui ont gagné trois rangs dans le modèle. Ceci nous amène à penser à l'importance de la mesure des concentrations des gaz précurseurs et destructeurs de l'ozone troposphérique pour caler le modèle et augmenter sa précision de prédiction.



**Figure 8. 7. Importance des variables (les 10 plus influentes) dans le modèle avec les données de la campagne matinale de mesure des concentrations d’ozone troposphérique**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)



**Figure 8. 8. Importance des variables (les 10 plus influentes) dans le modèle avec les données de la campagne de l’après-midi de mesure des concentrations d’ozone troposphérique**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

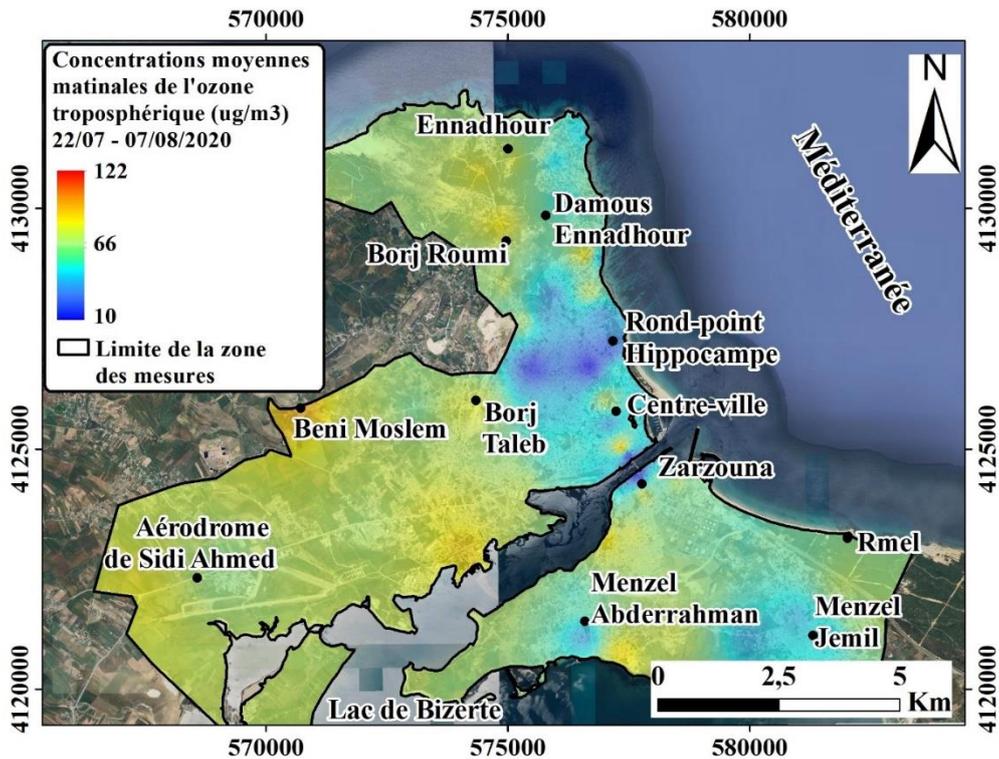


**Figure 8. 9. Importance des variables (les 10 plus influentes) dans le modèle avec les données de la campagne nocturne de mesure des concentrations d’ozone troposphérique**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

## 2.2. Simulation des concentrations de l’ozone troposphérique à Bizerte

Il est à noter que le modèle est fondé sur les mesures itinérantes qui ont subi un calcul de moyennes par période de la journée. Le masque utilisé dans la cartographie est celui de la limite de la zone investiguée (zone des mesures) qui n’a rien à voir avec les limites naturelles ou administratives et ce en vue de diminuer le biais des calculs. Les cartes générées sont de type raster (image) constituées de 1695 colonnes sur 1387 lignes avec une taille du pixel de sortie de 10 m.

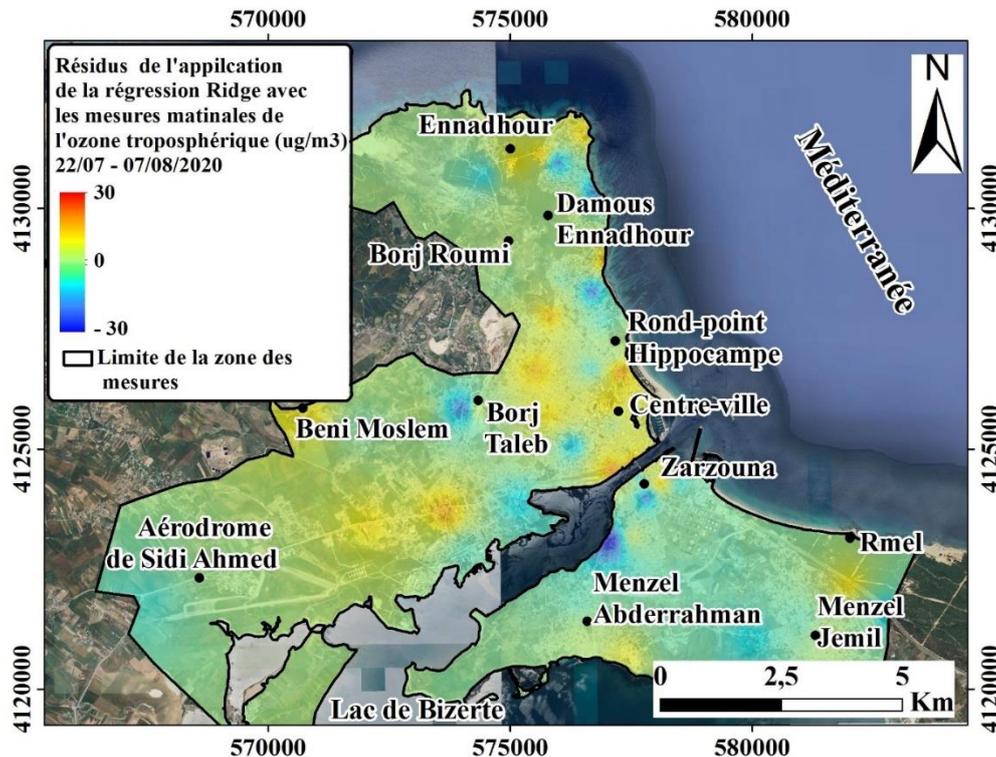
**Cas des mesures de 06h et 07h du matin pour la période allant du 22/07/2020 au 17/08/2020** (Fig. 8.10) : A cette heure-ci, les brises de montagne (hauteurs d’Ennadhour) et de terre (l’arrière-pays) sont encore actives. En effet, les cartes obtenues reflètent une situation (1) avant l’apparition de la brise de mer et (2) héritée de la nuit précédente. Les plages ou noyaux des concentrations les plus élevées se localisent sur les hauteurs d’Ennadhour et à l’arrière-pays. D’un degré moindre, on peut identifier deux autres noyaux à l’ouest de Zarzouna et à Menzel Abderrahman. Les valeurs de concentration d’ozone troposphérique les plus faibles sont localisées au niveau de Cité El Waha et Cité Bhira jusqu’au corniche. Il s’agit d’une zone résidentielle de « passage », pas très fréquentée différente du lieu de stockage (forêt Ennadhour et l’arrière-pays) et de réception (centre-ville).



**Figure 8. 10. Carte des concentrations moyennes matinales de l’ozone troposphérique à Bizerte, cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

La répartition spatiale des résidus (Fig. 8.11) est inversement proportionnelle au nombre d’observations c’est-à-dire que le résidu augmente (positivement ou négativement) là où on a moins de données et plus précisément là où la distance entre les observations est importante. L’importance de ces résidus résulte du fait que la variable explicative « intensité du rayonnement solaire » n’est pas intégrée dans la formule de la régression Ridge à cause de sa non disponibilité. Or, cette donnée est un facteur essentiel dans la formation de l’ozone troposphérique surtout pendant l’après-midi.

L’apport de la cartographie des résidus sera plus clair pendant la période de l’après-midi.

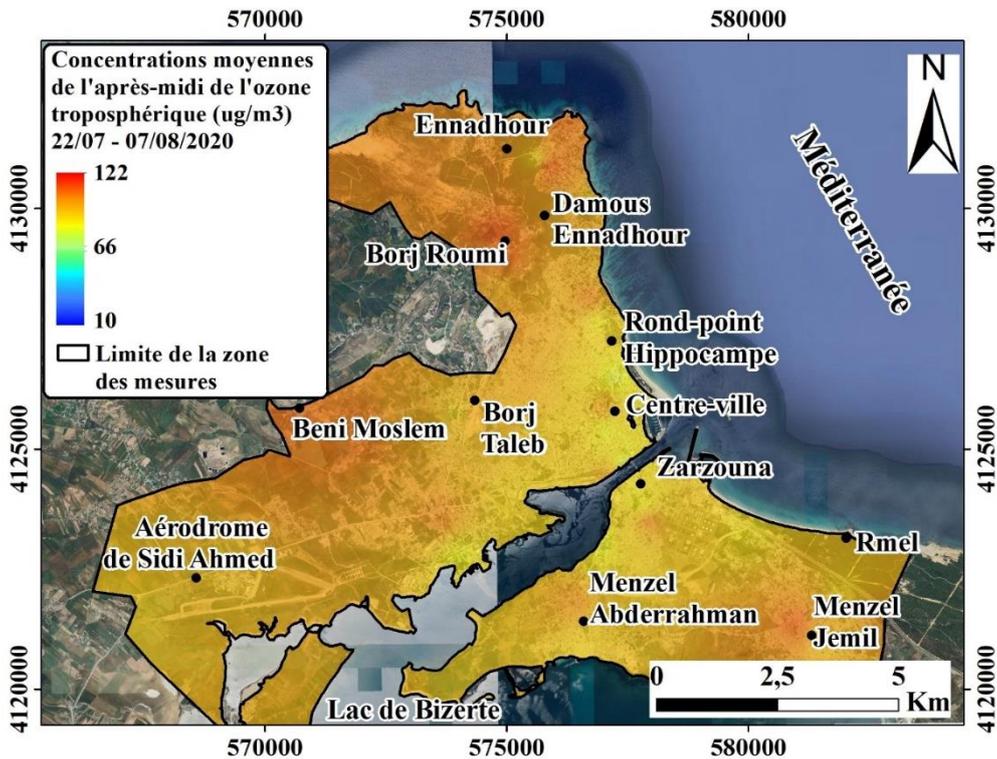


**Figure 8. 11. Carte des résidus de l'application de la régression Ridge avec les moyennes matinales de l'ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures)**

(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

**Cas des mesures de 16h et 18h (l'après-midi) pour la période allant du 22/07/2020 au 17/08/2020 (Fig. 8.12) :** A cette heure-ci, c'est la brise de mer qui est active. La plage des concentrations moyennes qui était sur les hauteurs d'Ennadhour a migré un peu vers le sud et s'est concentrée au niveau de Borj Roumi où on remarque que les concentrations de l'ozone troposphérique ont passé approximativement de  $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $114 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sous l'effet de la brise de mer septentrionale. Egalement, la brise de mer de la composante orientale achemine l'ozone formé au centre-ville vers la forêt du nord où sont remarquées les fortes concentrations d'ozone en absence d'agents destructeurs et car cet espace densément végétalisé dégage des COVs.

Aussi, à cette heure des mesures, l'effet de la brise de mer orientale est observé plus loin que le centre-ville, à quelques 7 Km à l'ouest, au niveau de Béni Moslem et ses environs. Au centre-ville, les moyennes des concentrations d'ozone troposphérique sont moins importantes (aux alentours de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Figure 8. 12. Carte des concentrations moyennes de l'après-midi de l'ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures)**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

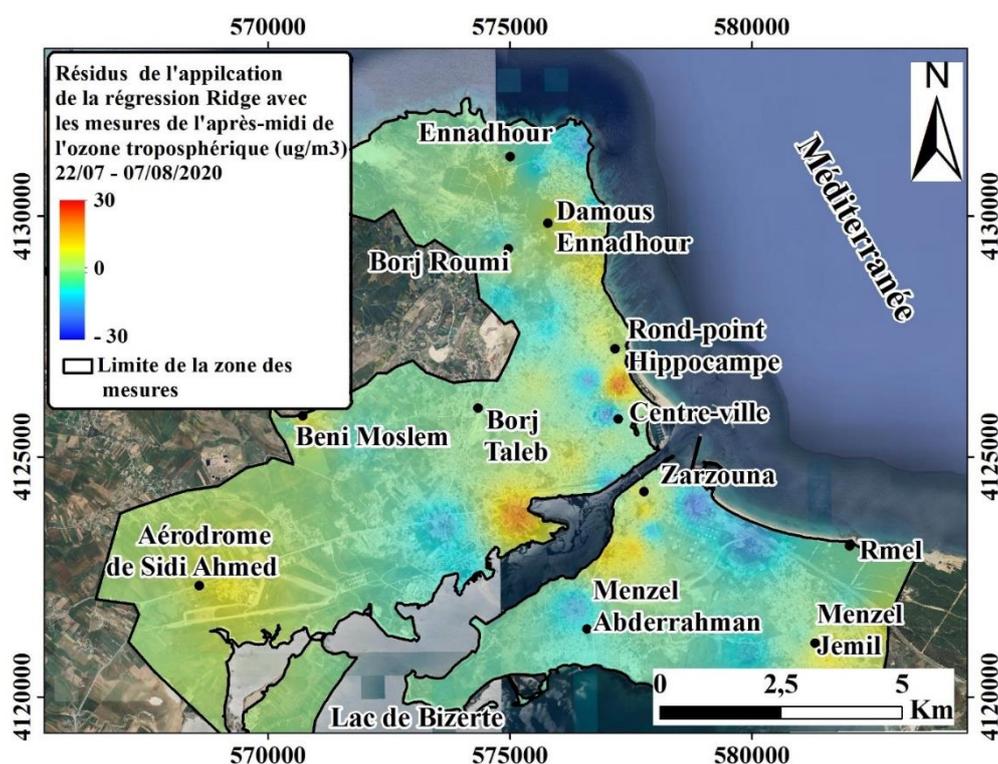
Par opposition à la carte des résidus de la modélisation des données matinales, celle de l'après-midi (Fig. 8.13) semble avoir des noyaux plus organisés spatialement :

- Une plage (de couleur orangé à rouge) où le modèle semble sous-estimer les concentrations de l'ozone troposphérique (valeurs des résidus positives et importantes) localisée au niveau de la partie centrale de la ligne de corniche.
- Une autre plage (de couleur bleu clair à bleu foncé) où le modèle semble surestimer les concentrations de l'ozone troposphérique (valeurs des résidus négatives et importantes) localisée au niveau de la route à l'ouest de la forêt Rmel à Bizerte Sud.

L'explication qu'on peut avancer se base essentiellement sur deux éléments importants :

- Certaines variables explicatives intégrées dans le modèle ont une variabilité importante, notamment pour « Distance à la mer » (633 m à 4272 m), « Elévation » (5,8 m à 125 m) et « Exposition » (84° à 303°). La prédiction dans une plage importante de variabilité des covariables affecte la qualité des estimations.
- Les réactions chimiques entre l'ozone troposphérique et ses précurseurs et destructeurs ne peuvent pas être exprimées simplement par le nombre de véhicules.

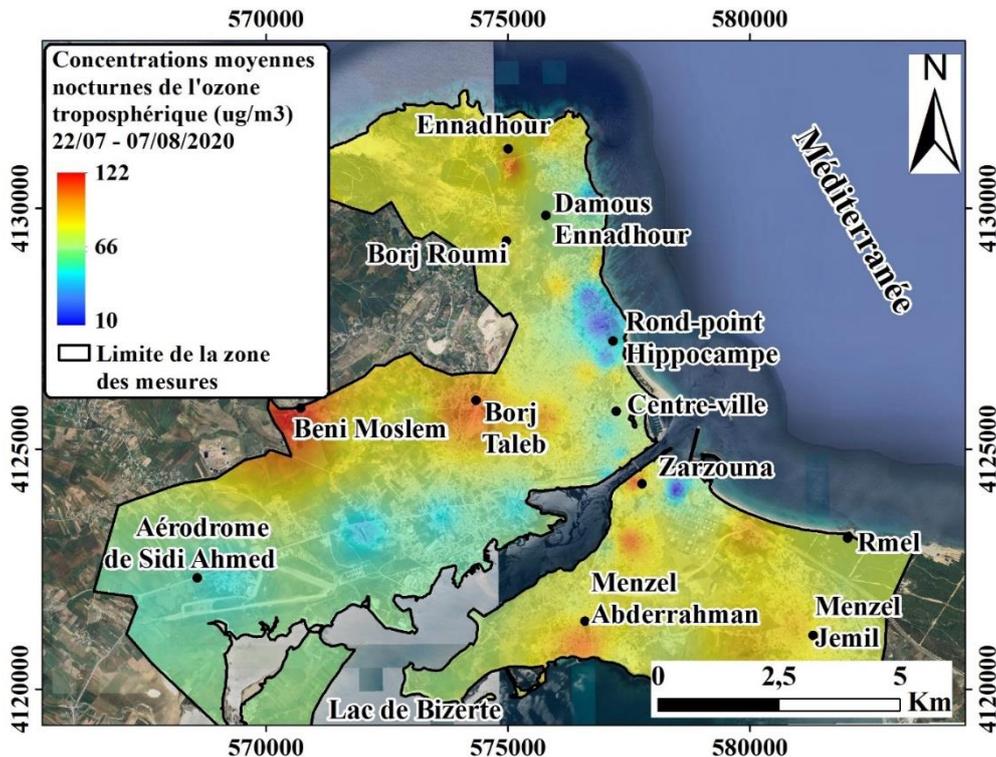
Les endroits où le modèle surestime les concentrations de l’ozone troposphérique sont aux alentours de la STIR à Zarzouna (une industrie qui dégage entre-autres le dioxyde de soufre un destructeur d’ozone). A rappeler que toute combustion d’énergie produit du NO et du NO<sub>2</sub>, mais au contact de l’air, le monoxyde d’azote est rapidement oxydé en dioxyde d’azote (atmo-nouvellequitaine, web). A ceci s’ajoute que parmi les gaz dégagés par les voitures figurent le monoxyde d’azote avec le dioxyde de soufre (destructeurs d’ozone) (Centre Canadien d’hygiène et de sécurité au travail – CCHST, web).



**Figure 8. 13. Carte des résidus de l’application de la régression Ridge avec les moyennes de l’après-midi de l’ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures**

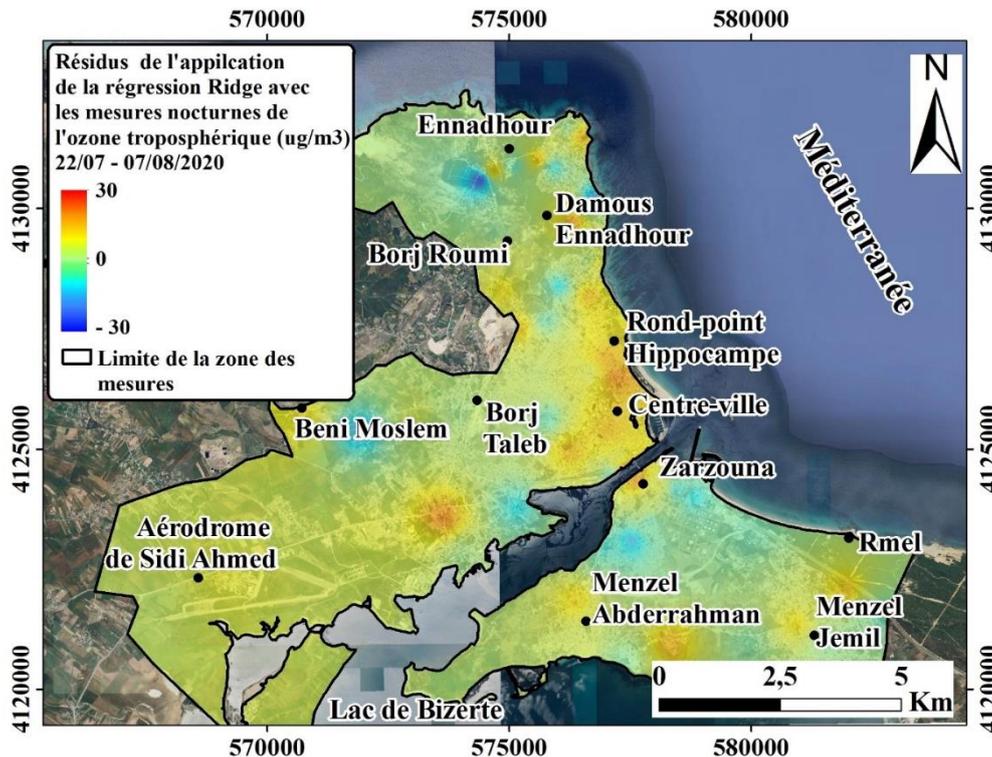
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

**Cas des mesures de 00h et 01h (le soir) pour la période allant du 22/07/2020 au 17/08/2020 (Fig. 8.14) :** Le soir, les fortes concentrations observées au niveau des hauteurs d’Ennadhour pendant l’après-midi perdent de leur importance. Au centre-ville, l’ozone troposphérique subit l’effet des agents destructeurs résultant essentiellement du trafic routier. Dans l’espace végétalisé de l’arrière-pays, surtout au niveau de Béni Moslem et ses environs, l’ozone en absence d’agents destructeurs (trafic routier faible), garde des niveaux importants de concentrations.



**Figure 8. 14. Carte des concentrations moyennes nocturnes de l’ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures**  
(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

La carte des résidus (Fig. 8.15) montre que le modèle a sous-estimé les concentrations d’ozone troposphérique tout au long de la ligne qui mène de l’aéroport de Sidi Ahmed jusqu’à avant la fin de la corniche avec un changement de « comportement » au niveau de l’usine de Ciment de Bizerte. A ce niveau le modèle semble surestimer les concentrations d’ozone troposphérique, car malgré la présence d’agents destructeurs tels que  $\text{SO}_2$  (dégagé par l’usine), le modèle prédit des valeurs de l’ordre de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les causes possibles sont similaires aux périodes matinale et de l’après-midi avec la différence que l’impact de l’intensité du rayonnement solaire s’estompe la nuit.



**Figure 8. 15. Carte des résidus de l'application de la régression Ridge avec les moyennes nocturnes de l'ozone troposphérique à Bizerte : cas du 22/07/2020 au 17/08/2020 : 430 mesures**

(Campagne de mesures semi-itinérantes du 22/07/2020 au 17/08/2020)

## Conclusion

Après analyses des sorties du modèle (cartes de répartition de l'ozone troposphérique et des résidus de modélisation), on peut en conclure que les modèles restent plus précis dans la partie centrale des valeurs (des concentrations et des résidus). Cependant, ils trouvent des difficultés (biais important, malgré un  $R^2$  satisfaisant) à prédire les valeurs de concentration de l'ozone troposphérique, parce que trois des paramètres intégrés dans les modèles ont une variabilité importante, notamment au niveau de la covariable « Distance à la mer » (633 m à 4272 m), la covariable « Elévation » (5,8 m à 125 m) et la covariable « Exposition » ( $84^\circ$  à  $303^\circ$ ). Nous constatons aussi que plus les zones se ressemblent dans leurs caractéristiques, plus la prédiction est bonne. Par ailleurs, les modèles semblent suffisamment précis le matin et le soir. Les anomalies observées dans les sorties du modèle, notamment pour l'après-midi, résultent entre autres de la non prise en considération du paramètre météorologique « Intensité du rayonnement solaire notamment à son UV » (à cause de sa non-disponibilité). Il peut être amélioré si on injecte cette information dans le modèle. De ce fait, un ajout ou une substitution de la campagne

de l'après-midi par une autre en fin de l'après-midi (vers 19h) peut apporter plus de clarification et d'éléments d'analyse dans les cartes.

Etant donné que le modèle ne prend pas en considération les directions des panachés de pollution, il peut être amélioré en l'intégrant dans une solution de calcul des accumulations / dispersions entre l'urbain et le rural et dans l'intra-urbain. La modélisation physique, même si elle nécessite l'injection de plusieurs paramètres et formules de calculs des interactions avec les autres polluants (précurseurs et destructeurs) et les flux dans l'intra-urbain, elle aura un apport considérable pour l'explication des situations de concentration que les modèles en deux dimensions trouvent des difficultés à les expliquer. *« L'utilisation d'une modélisation 3D permet une évaluation des niveaux de concentration plus précise en intégrant l'influence des formes du bâti sur les conditions de dispersion »* (Atmo Hauts-De-France, 2019).

Aussi, au terme de cette analyse, il serait intéressant de trouver un moyen de caler le modèle avec un facteur qu'on peut nommer « Zones homogènes ». Le travail qui reste à faire réside dans le fait de trouver un moyen efficace pour concevoir, formuler, traduire (sous forme de valeurs et formules) et intégrer ce nouveau facteur « Zones homogènes » dans le modèle.

## CONCLUSION GENERALE

A la lumière de cette thèse, nous avons pu dresser une classification détaillée des types de temps estivaux. Aussi, en exploitant les différentes données issues de la station synoptique de l'aérodrome de Sidi Ahmed ou de la station automatique installée au centre-ville combinées avec les mesures semi-itinérantes, le traitement des images satellites et des systèmes d'informations géographiques, nous avons pu analyser en détail les systèmes de brises thermiques et du sirocco à Bizerte. Les données sur la qualité de l'air issues des mesures en continu ou des campagnes semi-itinérantes multiscalaires nous ont permis de voir la variation spatiotemporelle de la pollution atmosphérique et d'identifier les points noirs à risque, notamment pour la santé humaine. La modélisation de la pollution photochimique, bien qu'elle nécessite d'être conduite avec un réseau plus dense de points de mesure avec plus de variables explicatives, elle reste un pas important qui met la lumière sur l'infrastructure, la démarche et les données nécessaires si on veut un résultat plus opérationnel au niveaux préventif, d'aménagement et d'organisation de l'agglomération.

Cette agglomération fait partie des pays bordant la Méditerranée, une mer fermée et bordée de relief où s'organisent de multiples climats locaux dus, entre autres, à des conditions météorologiques, climatiques et environnementales spécifiques.

Sur la base des données recueillies, la saison chaude de la période 1990-2022 a été classée en se basant sur les anomalies thermiques. Trois classes ont pu être identifiées : une classe très chaude, une moins chaude avec moins d'anomalies thermiques et une classe plus fraîche. Les principaux types de temps ont été identifiés pour la période 1990-2022, fondés sur l'état moyen de l'atmosphère et la circulation atmosphérique. Pour chaque type, nous connaissons les fréquences de son apparition et les caractéristiques des masses d'air qui lui sont associées.

A une échelle temporelle mensuelle, la saison chaude (juin, juillet, août et septembre) de la période 1990-2022 a été classée automatiquement en s'appuyant sur les anomalies thermiques. Trois classes ont été identifiées : une classe chaude, une plus fraîche et une intermédiaire. Nous avons pu identifier les caractéristiques thermiques de chaque mois ainsi que les fréquences des masses d'air apportées par un flux donné. Les principaux types de temps ont été identifiés pour la période 1990-2022 en se basant sur l'état moyen de l'atmosphère et la circulation atmosphérique associée.

Les mois de juillet et août comportent des classes caractérisées par la hausse des températures et par une faible hygrométrie. Le mois de septembre a un schéma inverse de celui de juin. Il commence par une classe chaude et fini par une classe plus fraîche et humide.

On enregistre le nombre le plus important des jours de sirocco et des jours de brise de mer pendant le mois d'août, mais c'est au mois de juin qu'on observe la séquence de jours successifs de sirocco la plus longue (05 jours de suite) de la période 1990-2022. Le mois d'août a connu aussi la température maximale la plus importante pendant un sirocco (48,8°C).

À l'échelle de l'agglomération de Bizerte, et dans le but de cerner l'impact des différences qui existent entre la ville et la campagne, entre la côte et l'intérieur, entre les hauteurs et les plaines, il est nécessaire de multiplier les mesures météorologiques soit par l'installation des stations automatiques, soit par des mesures itinérantes.

Nous avons exploité dans cette étude les données météorologiques horaires enregistrées entre 1990 et 2022 par la station de Sidi Ahmed à 11 Km de la mer à l'ouest ainsi que des données météorologiques issues de la station automatique installée au centre-ville de Bizerte durant l'été 2020. En complément, on a pu exploiter les données des campagnes semi-itinérantes réalisées en août 2021 et 2022. Les connaissances sur les caractéristiques des brises à Bizerte ont pu être améliorées à deux échelles : (1) au niveau de l'agglomération de Bizerte et de son arrière-pays et (2) à un niveau plus fin, au quartier européen au sud-est de Bizerte Nord dans le but de montrer l'effet de la distance par rapport à la mer et l'impact de la diversité des entités topographiques et de l'occupation du sol. En premier lieu, la brise de mer est ressentie sur les sites proches du littoral est. Elle est plus tardive dans l'arrière-pays de l'agglomération. *« La brise de mer, d'une vitesse oscillante entre 2 et 8 m/s, subit les effets perturbateurs de la topographie et de l'occupation du sol. L'agglomération de Bizerte et son arrière-pays se trouvent sous différents types de brises : brises de mer (est et nord), brises de lac (sud-ouest pour le centre-ville de l'agglomération et sud-est pour son arrière-pays), brises de terre (nord-ouest et ouest) et brise d'amont (nord et nord nord-ouest) »* (Sellami et al., 2022).

La fréquence des brises à faible vitesse est plus importante au niveau du centre-ville qu'à l'aérodrome de Sidi Ahmed. Il s'agit à la base de l'effet de rugosité dans le domaine urbain qui contribue à la diminution de la vitesse du vent. Jusqu'à 3,6 m/s, la fréquence des vents de cette catégorie, au centre-ville, avoisine les 80%. Etant donné que l'arrière-pays de Bizerte, là où se trouve la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed, est un espace dégagé, la fréquence des vents à vitesse plus élevée est plus importante à cela s'ajoute la position de l'anémomètre à une hauteur plus élevée (12m contre 9 au centre-ville).

Les brises à faibles vitesses (à modérées) restent plus fréquentes au centre-ville. Celles de la composante ouest sont plus fréquentes pendant les heures de nuit (brise de terre), alors que pendant le jour, ce sont les composantes nord et est qui sont les plus importantes (brise de mer).

À l'échelle du quartier européen, les données relevées pendant la période du jour où c'est la brise de mer qui est active, ont pu montrer l'influence de l'architecture urbaine sur la circulation de l'air. Les brises ont des vitesses plus importantes dans les rues les moins larges, à fort encaissement et qui ont des orientations perpendiculaires au trait de côte.

Afin de déceler en détail les fronts et les horaires de migration des brises (qui influence les taux de pollution atmosphériques), il est nécessaire de multiplier l'installation des stations météorologiques dans l'agglomération de Bizerte (étendue variable entre nord-sud et est-ouest), mais aussi dans les hauteurs du nord, la zone agricole de l'ouest et à Bizerte Sud.

En Tunisie, pendant la saison chaude, les brises thermiques et le sirocco sont les vents les plus fréquents.

Le sirocco est l'un des vents régionaux qui marquent le climat du bassin méditerranéen surtout sur sa bordure sud et est. L'étude des types de circulation à sirocco donne des exemples de l'importance des circulations méridiennes. L'étude fréquentielle du sirocco a montré que ce vent est plus fréquent au mois d'août, alors que la séquence la plus étendue est enregistré au mois de juin.

Les types de temps, avec l'effet du cadre topographique, environnemental et socio-économique, influencent considérablement la répartition spatiotemporelle de la pollution atmosphérique, notamment pendant la saison chaude et particulièrement celle photochimique, surtout dans un contexte de réchauffement climatique.

Sur la base des données sur la concentration des différents polluants étudiés issues des mesures réalisées au niveau de la station fixe de l'ANPE dans la mairie de Bizerte ou à travers les capteurs installés au centre-ville de Bizerte et à Zeqaq-Ezzouz ou aussi via les campagnes de mesures semi-itinérantes, on a pu mettre en exergue les fluctuations enregistrées, notamment intra-journalières et hebdomadaires et les facteurs qui les régissent, ainsi que leurs répartitions spatiales.

Si la région de la corniche, sur la côte est, est un endroit idéal pour échapper à la chaleur estivale, les concentrations de certains polluants atmosphériques y sont élevées en raison du trafic routier intense. D'autres sites sont sous l'effet de proximité des sources de polluants (Zarzouna à cause de STIR ou Borj Taleb à cause de la cimenterie et la carrière de ciment).

À une échelle plus fine, dans le quartier européen, l'analyse a permis l'identification des points noirs où les concentrations des polluants enregistrent des valeurs élevées. Il s'agit essentiellement des rond-points et des croisements très fréquentés.

Les « zones noirs » identifiées demandent une attention particulière surtout que certaines d'entre-elles se trouvent dans des endroits pratiqués pour le bien-être qu'elles offrent (Forêt, bord de la mer, voisinage de l'hôpital (Sellami *et al*, 2021).

La modélisation dans ses deux facettes : statistique et cartographique apporte beaucoup d'appui à l'interprétation et l'analyse des situations. Toutefois, elle reste insuffisante à cause de la difficulté de conception et d'intégration de certains paramètres agissant sur les degrés de pollution atmosphérique, surtout sur un plan 2D, comme les différentes formes des vents impactant leurs turbulences et leurs vitesses (effet venturi, effet tourbillon, ...) ou aussi l'effet 3D de la topographie (cuvette, col, vallée, ...). Il est très important aussi d'intégrer dans le modèle les différents dégagements des sources de pollution fixes et mobiles afin d'améliorer les calculs et les sorties du modèle ce qui permettra de mieux cartographier les différentes situations. La modélisation physique en 3D des paramètres, moyens et formes de dispersion/accumulation de la pollution est un terrain à investiguer par les géographes/climatologues.

Les résultats obtenus lors des différentes campagnes de mesure effectuées pendant le printemps et l'été 2020, 2021 et 2022, nous renseignent, entre autres, sur les sites et circuits favorisés soit pour la densification du réseau, soit pour les trajets à emprunter pour les mesures itinérantes. Ces résultats nous renseignent également sur les actions et les démarches opérationnelles à suivre pour une meilleure planification et aménagement de l'espace de l'agglomération en matière de la qualité de l'air et en relation avec les différentes activités anthropiques et les comportements socio-économiques.

Il est conseillé en vue de mieux appréhender la situation sur la pollution atmosphérique en relation avec les types de temps à Bizerte, de multiplier les stations météorologiques et de mesure des polluants dans les endroits représentatifs : Ennadhour, Beni Moslem, Centre-ville, Menzel Abderrahman. Aussi, les autorités compétentes en concertation avec les spécialistes du domaine, doivent penser à la vulgarisation de l'information environnementale sur les pics de la pollution atmosphérique (à travers des panneaux lumineux d'information, médias, ...).

A une échelle stratégique, même si juridiquement ils existent sous forme de « Plans de conservation de la qualité de l'air » il est opportun d'activer les mesures qui leurs sont

connexes aux échelles de contrôle et de sanctions des infractions, mais aussi les mesures de prévention qui, sur le plan opérationnel d'application, restent à un niveau timide (Journal Officiel de la République Tunisienne (JORT), 04/06/2007 et 18/05/2018). Une constatation appuyée par les résultats d'évaluation des mesures entreprises par la Tunisie en matière d'assurance d'un environnement favorable à la santé. Ces résultats évoquent que « *malgré la diversité des programmes, les estimations de l'OMS indiquent que la cible de « réduction du nombre de décès et des maladies dus à des substances chimiques dangereuses et à la pollution et à la contamination de l'air, de l'eau et du sol » est loin d'être réalisée* ». D'après l'OMS, « *l'année 2012 était marquée par 4631 morts attribués à la pollution de l'air ambiant réparties entre 2798 hommes et 1833 femmes.* » (République Tunisienne, Nations Unies, 2019).

Dans le but de les institutionnaliser et de les durabiliser, ces plans peuvent être convertis en des plans d'action régionaux pour la lutte contre la pollution atmosphérique (PARLCPA) synchronisés avec un plan d'envergure nationale. Pour ce faire, un Comité intersectoriel de suivi de la qualité de l'air (CISQA) est à instaurer. Ce comité doit réunir les décideurs de la région, les scientifiques, les chercheurs, mais aussi les spécialistes de la communication et de la vulgarisation en vue de préparer aux différents niveaux : du stratégique à l'opérationnel, les actions à mener pour préserver un environnement vivable (à Bizerte ou dans les autres villes les plus touchées par la pollution atmosphérique comme à Sfax ou à Gabes) en terme de la qualité de l'air.

## Références bibliographiques<sup>36</sup>

- 1) Académie des Sciences. (1993). Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. Rapport n°30 – Éd. Technique et Documentation-Lavoisier, Paris, 262 p.
- 2) ADEME (Agence de la transition écologique). (2002). Classification et critères d’implantation des stations de surveillance de la qualité de l’air – ADEME.
- 3) AIRPARIF (L’observatoire de la qualité de l’air en Île-de-France), (2016). Inventaire régional des émissions en Ile-de-France, Année de référence 2012 – éléments synthétiques, Edition mai 2016, Paris (France), Airparif.
- 4) Al Barakeh, Z. (2012). *Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs – méthode mixte de classification et de détermination d’un indice de pollution*, Thèse de doctorat de l’École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 228 p.
- 5) Anderson H.R. (2009). Air pollution and mortality : A history, *Atmospheric Environment*, 43(1), 142-152.
- 6) Annesi-Maesano I. (2019). Pollution de l’air : actualités, *La lettre du pneumologue*, 22-1, 7-11.
- 7) ANPE (Agence Nationale de Protection de l’Environnement). (1988). Loi n° 88-91 du 2 août 1988 portant création d’une agence nationale de protection de l’environnement.
- 8) Arroyo, V., Diaz, J., Salvador, P., & Linares, C. (2019). Impact of air pollution on low birth weight in Spain: An approach to a National Level Study. *Environmental research*, 171, 69-79.
- 9) Atmo Hauts-de-France, 2018. Modélisation 3D Stade BP Saint-Pol-sur-Mer, Convention ATMO /CUD 2018, Rendu final, 24 p
- 10) Azri, C. (2000). *Contribution des sources mobiles et fixes à la pollution atmosphérique dans la région de Sfax (Tunisie)* (Doctoral dissertation, Université de Tunis II, Faculté des Sciences de Tunis), 239.
- 11) Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2003). *Atmosphere, weather, and climate*. Psychology Press.

---

<sup>36</sup> Norme appliquée : American Psychological Association (APA), 7<sup>ème</sup> édition, 2020

- 12) Basly, L. (2000). *Téledétection pour la qualité de l'air en milieu urbain* (Doctoral dissertation, Université Nice Sophia Antipolis), 194
- 13) Belghith, M. 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* (Doctoral dissertation, Université de Tunis II, Faculté des Sciences de Tunis), 194.
- 14) Belhadj Khedher, C., El Melki, T., & Mouillot, F. (2020). Saharan hot and dry Sirocco winds drive extreme fire events in Mediterranean Tunisia (North Africa). *Atmosphere*, 11(6), 590.
- 15) Beltrando, G. Chémery (1995). *Dictionnaire du climat. Larousse ed., Paris (FR)*.
- 16) 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), 49-61.
- 17) Ben Boubaker, H. (1988). Le flux de Sud-Est maritime (Chlouk) et ses incidences topothermiques en Tunisie. *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 11, Aix en Provence, France, 401-408.
- 18) Ben Romdhane, S. (2017). *Effets du climat et de la pollution de l'air sur la santé respiratoire à Tunis* (Doctoral dissertation, Sorbonne Paris Cité), 371.
- 19) Berriche M., (2023), *Aspects du climat urbain et qualité de l'air à Gabès (Tunisie méridionale)* (Doctoral dissertation, Paris Cité), 321
- 20) Bliefert, C., et Perraud, R. (2007). *Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets*. De Boeck Supérieur.
- 21) Borne, K., Chen, D., & Nunez, M. (1998). A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(8), 901-914.
- 22) Bouchlaghem, K., & Nsom, B. (2012). Effect of atmospheric pollutants on the air quality in Tunisia. *The Scientific World Journal*, 2012.
- 23) Calistri, P., Giovannini, A., Conte, A., Nannini, D. A. O., Santucci, U., Patta, C., ... & Caporale, V. (2004). Bluetongue in Italy: part I. *Vet. Ital*, 40(3), 243-251.

- 24) Cantat, O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (191), 75-102.
- 25) Cariolet, J. M., Vuillet, M., et Diab, Y. (2019). Systèmes urbains et pollution de l'air extérieur : Application du concept de résilience. *Cybergeo: European Journal of Geography*, En ligne.
- 26) Carletti, R., Picci, M., & Romano, D. (2000). Kriging and bilinear methods for estimating spatial pattern of atmospheric pollutants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 63, 341-359.
- 27) Carrega, P. (1989). Vents et échelles de contraintes géographiques : exemples en région niçoise. *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 2, De Pavia, Italie, 83-88.
- 28) Carrega, P. (1994). Topoclimatologie et habitat. *Analyse spatiale quantitative et appliquée*, 35, 1-408.
- 29) Carrega, P. (2004). Avant-propos sur les « Types de temps ». *Norois. Environnement, aménagement, société*, (191), 7-9.
- 30) Carrega, P. (2013). Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive. *Climatologie*, 10, 9-34.
- 31) CEE (Communauté économique européenne). (1999). Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, de 1979 et ses protocoles de 1998 relatifs aux polluants organiques persistants et aux métaux lourds.
- 32) Chang, W., Heikes, B. G., & Lee, M. (2004). Ozone deposition to the sea surface: chemical enhancement and wind speed dependence. *Atmospheric Environment*, 38(7), 1053-1059.
- 33) Charfi, S., et Dahech, S. (2015). La pollution par l'ozone à Sfax : variabilité temporelle et temps associés aux fortes concentrations. *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 28, Liège, France, 117-122.
- 34) Che, H., Zhang, X. Y., Xia, X., Goloub, P., Holben, B., Zhao, H., ... & Shi, G. (2015). Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) 2002–2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(13), 7619-7652.

- 35) Cheng, Y., Shen, L., Teng, M., Liu, H., Cheng, W., Zhang, B., & Wu, C. (2023). How to use lake breeze circulations to improve urban natural ventilation: A case study in a typical inland multi-lake megacity. *Landscape and Urban Planning*, 230, 15 p.
- 36) Chiappini, L. (2009). Métrologie des particules PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>—Caractérisation Chimique des Particules—Veille sur les études de sources. *Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, Paris*.
- 37) Coudé-Gaussen, G. (1990). Les régions-sources de poussières au Sahara. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 1(2), 134-141.
- 38) Coudé-Gaussen, G. (1991). *Les poussières sahariennes*. John Libbey Eurotext.
- 39) Dahech, S. (2007). *Le vent à Sfax (Tunisie) : impact sur le climat et la pollution atmosphérique* (Doctoral dissertation, Paris 7), 351.
- 40) Dahech, S., et Beltrando, G. (2012). Le vent de sable dans le Sud tunisien : conséquences pour l'homme à Sfax. *Météorologie*, (79), 40-50.
- 41) Dahech, S., et Charfi, S. (2017). Aspects topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie): îlot de chaleur et brises thermiques. *Les Impromptus*, 138-158.
- 42) Dahech, S., et Saihia, A. (2019). Pollution atmosphérique et brise de mer à Annaba (Nord-Est de l'Algérie): cas de l'ozone et du dioxyde de soufre. *Climatologie*, 16, 1-22.
- 43) Dahech, S., Beltrando, G., et Bigot, S. (2005). Utilisation des données NOAA-AVHRR dans l'étude de la brise thermique et de l'îlot de chaleur. Exemple de Sfax (SE tunisien). *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- 44) 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.
- 45) Dahech, S., Daoud, A., et Beltrando, G. (2011). Les inégalités spatiales de la qualité de l'air dans l'agglomération de Sfax et ses environs : Le cas Des températures, de la brise, du CO et SO<sub>2</sub>. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- 46) Dahech, S., Berges, J. C., et Beltrando, G. (2012). Localisation et dynamique du front de la brise de mer au Maghreb oriental. *Climatologie*, 9, 59-81.
- 47) Damato, F., Planchon, O., Dubreuil, V., et Gouéry, P. (2003). Etude par télédétection de la localisation des fronts de brise de mer dans le Nord-Est du Brésil. *Anais XI SBSR*, 1165-1172.

- 48) Décret gouvernemental n° 2018-447 du 18 mai 2018, fixant les valeurs limites et les seuils d'alerte de la qualité de l'air ambiant, 2018. Journal Officiel de la République Tunisienne, 25 mai 2018
- 49) Décret n° 2010-2519 du 28 septembre 2010, fixant les valeurs limite à la source des polluants de l'air de sources fixes, 2010. Journal Officiel de la République Tunisienne, 5 octobre 2010
- 50) Deletraz, G. (2002). *Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne. Incidences des émissions d'oxydes d'azote en vallées d'Aspe et de Biriadou (Pyrénées)* (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour), 565.
- 51) Derbez, M., Mosqueron, L., et Nedellec, V. (2001). *Quelles sont les expositions humaines à la pollution atmosphérique ?*, La documentation Française.
- 52) Directive, A. Q. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament.
- 53) Douguedroit, A. (2004). Quelle « exception française » en matière de « Types de temps»? *Noréis. Environnement, aménagement, société*, (191), 33-39.
- 54) Dubief, J. (1952). Le vent et le déplacement du sable au Sahara. *Trav. Inst. Rech. Sahar*, 8, 123-162.
- 55) Dubief, J. (1953). Les vents de sable dans le Sahara Français. *Colloques Internationaux de CNRS*, 35, 45-70.
- 56) Duché, S. (2013). *La pollution de l'air en région parisienne : exposition et perception sur les sites touristiques* (Doctoral dissertation, Université Paris-Diderot-Paris VII), 258.
- 57) Durand-Dastès, F. (2004). À propos des notions de type de temps et de type de circulation. *Noréis. Environnement, aménagement, société*, (191), 29-32.
- 58) EEA (European Environment Agency). (2005). Annual report
- 59) El Melki, T. (2007). Inversions thermiques et concentrations de polluants atmosphériques dans la basse troposphère de Tunis. *Climatologie*, 4, 105-129.
- 60) El Melki, T. (2008). Variation spatiotemporelle de la pollution photochimique dans le grand Tunis. *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 21, Montpellier, France, 243-248
- 61) El Melki, T. (2010). Contribution à l'étude des lithométéores en Tunisie. *Climat, société et dynamiques des paysages ruraux en Tunisie*, 46-88

- 62) Escourrou, G. (1990). La spécificité du climat de l'agglomération parisienne/The unique character of the Paris urban area's climate. *Géocarrefour*, 65(2), 85-89.
- 63) Européen, C. (1999). Directive 1999/30/CE du conseil du 22 avril 1999 relative à la fixation des valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant. *Journal officiel des Communautés européennes L*, 163, 41-163.
- 64) Fischer, L. (2005). Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg. *Revue Géographique de l'Est*, 45(2), 99-112.
- 65) FNORS, 2008. Santé et environnement dans les régions de France, Rapport, Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la vie associative
- 66) Frangi, J. P., Jacquemoud, S., Puybonnieux-Textier, V., et Lazar, H. (1996). Suivi spatio-temporel de la concentration en NOx en île de France. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes*, 323(5), 373-379.
- 67) FRIEDRICH EBERT STIFTUNG, 2016. Stratégie Sfax 2030 deuxième phase du projet, 188 p
- 68) Fryrear, D. W. (1985). Soil cover and wind erosion. *Transactions of the ASAE*, 28(3), 781-784.
- 69) Garcia, J., Colosio, J., et Jamet, P. (2001). Les indices de la qualité de l'air. *Ecole des Mines de Paris, Paris*.
- 70) Giambanis, A., Anagnostopoulos, J., et Bergeles, G. (1998). Numerical simulation of pollutant dispersion and photochemical kinetics over complex terrain. *Applied Mathematical Modelling*, 22(4-5), 313-329.
- 71) Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3).
- 72) Goudie A.S., Middleton N.J. (2001). Tempêtes de poussière sahariennes : nature et conséquences. *Science de la Terre*, 56, 179-204
- 73) Hachicha-Gasmi N., 2019. *Dynamique des brises littorales dans le Grand-Tunis et impacts sur la qualité de l'air* (Doctoral dissertation, Université de Tunis)

- 74) Henia, L. (1980). Le sirocco et les types de circulation à sirocco en Tunisie. *Revue tunisienne de géographie*, (5), 61-87.
- 75) Hénia, L., et Mougou, R. (1997). Contribution à l'étude des phénomènes atmosphériques à risques en Tunisie: le cas du Sirocco. *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 10, Québec, Canada, 84-92.
- 76) Hoerl, A. E., & Kennard, R. W. (1970). Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics*, 12(1), 55-67
- 77) Husar, R. B., Husar, J. D., & Martin, L. (2000). Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data. *Atmospheric Environment*, 34(29-30), 5067-5078.
- 78) IEVP CT MED-UE, 2016. Gouvernance de la qualité de l'air dans les villes méditerranéennes, Rapport final du projet GOUV'AIRNANCE
- 79) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 1552 p
- 80) Jeanne, N., Fangeat, E., et Ba, M. (2003). Contributions pratiques d'une géostatistique raisonnée en environnement : méthodes et application à la cartographie nationale de la pollution par l'ozone en France.
- 81) Journal Officiel de la République Tunisienne. (2007). Loi n° 2007-34 du 4 juin 2007, sur la qualité de l'air, 45, pp 1853-1855
- 82) Journal Officiel de la République Tunisienne. (2018). Arrêté du ministre des affaires locales et de l'environnement et du ministre de la santé du 18 mai 2018, fixant le nombre d'habitants requis pour déterminer les agglomérations urbaines nécessitant l'élaboration de plans de conservation de la qualité de l'air., 42, p 1893
- 83) Karagulian, F., Temimi, M., Ghebreyesus, D., Weston, M., Kondapalli, N. K., Valappil, V. K., ... & Al Abdooli, A. (2019). Analysis of a severe dust storm and its impact on air quality conditions using WRF-Chem modeling, satellite imagery, and ground observations. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12, 453-470.
- 84) Kazadi, J., et Kamingu, G. (2022). Régression régularisée avec R. In *Internal workshops of the OPTIMALL laboratory (Optimization and Machine Learning Laboratory)*, Kinshasa, Kenya, 42.
- 85) Kchih, H. (2007). La qualité de l'air en Tunisie, Centre IFEDA

- 86) Kchih, H., Cherif, S. (2015). Evaluation de la pollution gazeuse majeure et des Interactions locales en O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub> à Tunis (Tunisie), *Journal of the Tunisian Chemical Society*, 17, 31-37
- 87) Khreis, H., Warsow, K. M., Verlinghieri, E., Guzman, A., Pellecuer, L., Ferreira, A., ... & Nieuwenhuijsen, M. (2016). The health impacts of traffic-related exposures in urban areas: Understanding real effects, underlying driving forces and co-producing future directions. *Journal of Transport & Health*, 3(3), 249-267.
- 88) Kulkarni, N., & Grigg, J. (2008). Effect of air pollution on children. *Paediatrics and child health*, 18(5), 238-243.
- 89) Legrand, M., Bertrand, J. J., Desbois, M., Menenger, L., & Fouquart, Y. (1989). The potential of infrared satellite data for the retrieval of Saharan-dust optical depth over Africa. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 28(4), 309-319.
- 90) Leuzzi, G., & Monti, P. (1998). Particle trajectory simulation of dispersion around a building. *Atmospheric Environment*, 32(2), 203-214.
- 91) Lin, C., Gillespie, J., Schuder, M. D., Duberstein, W., Beverland, I. J., & Heal, M. R. (2015). Evaluation and calibration of Aeroqual series 500 portable gas sensors for accurate measurement of ambient ozone and nitrogen dioxide. *Atmospheric Environment*, 100, 111-116.
- 92) Madelin, M. (2004). *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l'air et des températures minimales* (Doctoral dissertation, Université Paris-Diderot-Paris VII), 412.
- 93) Maheras, P. (1984). Weather-type classification by factor analysis in the Thessaloniki area. *Journal of climatology*, 4(4), 437-443.
- 94) Maheras, P. (1984, November). Situations synoptiques et types de temps journaliers à Thessalonique. In *Annales de Géographie* (pp. 649-665). Armand Colin.
- 95) Maignant, G. (2007). Dispersion de polluants et morphologie urbaine. *Espace géographique*, 36(2), 141-154.
- 96) MALE (Ministère des Affaires Locales et l'Environnement) / Direction Générale de l'Environnement et de la Qualité de la Vie, Etude relative à l'amélioration de la qualité de l'air dans la région de Bizerte, (2006), 282 p.

- 97) MALE (Ministère des Affaires Locales et l'Environnement) et PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement en Tunisie), (2012). Emissions des Gaz à Effet de Serre de la Tunisie en 2012, 20 p
- 98) MALE (Ministère des Affaires Locales et l'Environnement) et PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement en Tunisie), (2018). Troisième Communication Nationale de la Tunisie au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, 36 p
- 99) Maneux, E. (2001). Quelles sont les techniques pour surveiller la qualité de l'air?– PRIMEQUALPREDIT 1995-2000.
- 100) Martin, N. (2008). *La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen : les Alpes-Maritimes* (Doctoral dissertation, Université Nice Sophia Antipolis), 290.
- 101) Martin, N., et Adnès, C. (2014). Spatialisation de l'ozone en milieu urbain et périurbain. *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 27, Dijon, France.
- 102) Martin, N., et Carrega, P. (2007). Les types de circulation atmosphérique et la pollution par l'ozone dans les Alpes-Maritimes. In *Journées interdisciplinaires de la Qualité de l'Air* (p. 10).
- 103) Martin, N., et Carrega, P. (2008). La variabilité spatiale de l'ozone en milieu urbain et périurbain : le cas de Nice. In *Journées Interdisciplinaires de la Qualité de l'Air* (p. 10).
- 104) Masson, V., de Coning, E., Baklanov, A., Amorim, J., Augros, C., Bélair, S., ... & Swerdlin, S. (2021, April). WMO Research Demonstration Project" Paris 2024 Olympic Games": An international initiative towards 100m-resolution meteorological and air quality forecasting in urban areas. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU21-15389.
- 105) Mastrodicasa, A., Cuenoud, A., Pasquier, M., et Carron, P. N. (2018). Intoxication aiguë au dioxyde de carbone. *Annales françaises de médecine d'urgence*, 8(5), 326-331.
- 106) Mathe, F. (2010). Evolution de la classification et des critères d'implantation des stations de mesure de la qualité de l'air - participation à la réactualisation du guide de classification des stations, Laboratoire central de Surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), Ecole des Mines de Douai - Département Chimie et Environnement, 84 p

- 107) Maumy-Bertrand, M. (2020). *Comment la modélisation statistique contribue-t-elle à la recherche biomédicale et à la R et D de l'industrie ?* (Doctoral dissertation, Université de Strasbourg), 185.
- 108) Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric environment*, 33(24-25), 4029-4037.
- 109) Meagher, J. F., Lee, N. T., Valente, R. J., & Parkhurst, W. J. (1987). Rural ozone in the southeastern United States. *Atmospheric Environment* (1967), 21(3), 605-615.
- 110) MedECC, 2020. Changement climatique et environnemental dans le bassin méditerranéen, Situation actuelle et risques pour le futur Premier rapport d'évaluation sur la Méditerranée (MAR1), Résumé à l'intention des décideurs
- 111) Mediterranean Cities and Climate Change (MC3) : Laboratoire Population Environnement Développement (LPED), Unité mixte de recherche 151, Aix-Marseille Université et Institut de recherche pour le développement, 2020. Villes méditerranéennes et changement climatique, 7 p
- 112) MEHAT-DGACT (Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire - Direction Générale de l'Aménagement du Territoire), (2011). Etude du schéma directeur d'aménagement de la région économique du nord-est, 156 p
- 113) MEHAT-DGPC (Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire-Direction Générale des Ponts et Chaussées, Direction de l'Exploitation et de l'Entretien Routier), (2007), Recensement général de la circulation de 2007
- 114) Michelot, N., et Carrega, P. (2014). Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes : mécanismes et conséquences en images. *EchoGéo*, (29), En ligne.
- 115) Molesworth, A. M., Thomson, M. C., Connor, S. J., Cresswell, M. P., Morse, A. P., Shears, P., ... & Cuevas, L. E. (2002). Where is the meningitis belt? Defining an area at risk of epidemic meningitis in Africa. *Transactions of the royal society of tropical medicine and hygiene*, 96(3), 242-249.
- 116) Molloy, S.L., Mihaltcheva, S. (2013). Extreme Weather Events, Climate Vulnerability, *Academic Press*, 3-16
- 117) Monks, P. S., Granier, C., Fuzzi, S., Stohl, A., Williams, M. L., Akimoto, H., ... & von Glasow, R. (2009). Atmospheric composition change—global and regional air quality. *Atmospheric environment*, 43(33), 5268-5350.

- 118) Mounier, J. (1977). Le type de temps un choix pour le géographe : climatologie synoptique ou climatologie compréhensive. *Cahiers du Centre de Climatologie de Dijon*, 7, 99-117.
- 119) Moussiopoulos, N., Berge, E., Bohler, T., De Leeuw, F., Gronskei, K.E., Mylona, S., Tombrou, M. (1996). Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models. Report of the European Topic Centre on Air Quality, 94 p
- 120) Neumann, J., & Mahrer, Y. (1971). A theoretical study of the land and sea breeze circulation. *Journal of Atmospheric Sciences*, 28(4), 532-542.
- 121) Norme tunisienne homologuée NT 106.04, 1994. Protection de l'environnement : valeurs limites et valeurs guides pour certains polluants dans l'air ambiant, en dehors des locaux de travail
- 122) Nouaceur, Z. (1999). *Evolution récente des lithométéores en Mauritanie* (Doctoral dissertation, Université Lyon 3), 503.
- 123) Nouaceur, Z. (2001). L'évolution des lithométéores en Mauritanie confirme une plus grande efficacité de l'action éolienne. *Cybergéo*, 203, 16 p
- 124) Nouaceur, Z. (2004). Brume sèche, brume de poussière, chasse-sable et tempête de sable. Des types de temps spécifiques des régions sèches. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (191), 121-128.
- 125) Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations, *Journal of climatology*, 1, 237-254
- 126) Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24
- 127) Oke, T.R. (1993). Meteorology for the urban environment: Technology-Transfer Options. *WMO Bulletin*, 42, 214-217
- 128) Oliva, P., Coudé-Gaussen, G., Delannoy, H., Dorize, L., Rognon, P., et Tabeaud, M. (1985). Etude de la dynamique de quelques lithométéores sahariens par télédétection spatiale. *Méditerranée*, 54(1), 21-52.
- 129) OMM (Organisation Météorologique Mondiale). (1956). Atlas international des nuages, vol. I.
- 130) OMM (Organisation Météorologique Mondiale). (1973). Guide des instruments et des observations météorologiques, n° 8.

- 131) OMS (Organisation Mondiale de la Santé). (2014). Burden of disease from the joint effects of household and ambient air pollution for 2012. Rapport de l'OMS (WHO)
- 132) OMS (Organisation Mondiale de la Santé). (2018). Ambient air pollution - a major threat to health and climate, Rapport de l'OMS (WHO)
- 133) Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 527-530.
- 134) Pandya, S., Ghayvat, H., Sur, A., Awais, M., Kotecha, K., Saxena, S., ... & Pingale, G. (2020). Pollution weather prediction system: smart outdoor pollution monitoring and prediction for healthy breathing and living. *Sensors*, 20(18), 5448.
- 135) Panopoulou, A. (2019). *VOC source apportionment and emission inventory evaluation over the great Athens, comparison with other cities of the Mediterranean basin* (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai; University of Crete), 329.
- 136) Pascal, L. (2009). Effets à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité, | *Rev Mal Respir*, 26, 207-219.
- 137) Penkett, S. A., Blake, N. J., Lightman, P., Marsh, A. R. W., Anwyl, P., & Butcher, G. (1993). The seasonal variation of nonmethane hydrocarbons in the free troposphere over the North Atlantic Ocean: Possible evidence for extensive reaction of hydrocarbons with the nitrate radical. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D2), 2865-2885.
- 138) Percy, K. E., & Ferretti, M. (2004). Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environmental pollution*, 130(1), 113-126.
- 139) Perkins, S. (2001). Dust, the thermostat. *Science News*, 160(13), 200.
- 140) Philippe, C. (2004). *Analyse de la pollution atmosphérique aux échelles locale et régionale. Modélisation spatiale et temporelle à l'aide d'une méthode de scénarii épisodiques* (Doctoral dissertation, INSA de Rouen), 223.
- 141) Planchon, O. (1996). *Les climats maritimes dans le Monde* (Doctoral dissertation, Dijon).
- 142) Planchon, O., Cantat, O., et Quénol, H. (2015). Types de temps et types de circulation atmosphérique : essai de mise en relation à Angers et Bordeaux (France). Publication de l'Association Internationale de Climatologie, 27, Liège, France, 381-386.

- 143) Planchon, O., Dubreuil, V., Damato, F., Gouéry, P., et Decaux, S. (2004). Recherche sur les types de temps associés aux brises de mer. Une méthode d'analyse par télédétection. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (191), 59-74.
- 144) PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement). (2021). Désignation de la mer Méditerranée dans son ensemble en tant que zone de contrôle des émissions d'oxydes de soufre, Décision IG.25/14, 133 p
- 145) Quénot, H. (2002). *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral* (Doctoral dissertation, Université Université USTL), 283.
- 146) République Tunisienne / Nations Unies. (2019). Rapport national volontaire sur la mise en œuvre des objectifs de développement durable (ODD), Forum Politique de Haut Niveau pour le Développement Durable à New York -2019, 148.
- 147) Roberts, S., & Martin, M. (2005). A critical assessment of shrinkage-based regression approaches for estimating the adverse health effects of multiple air pollutants. *Atmospheric Environment*, 39(33), 6223-6230.
- 148) Salathé, C., Pellaton, C., Vallotton, L., Coronado, M., & Liaudet, L. (2012). Le coup de chaleur d'exercice. *Revue médicale suisse*, (366), 2395
- 149) Salles, J., Janischewski, J., Jaecker-Voirol, A., & Martin, B. (1996). Mobile source emission inventory model. Application to Paris area. *Atmospheric Environment*, 30(12), 1965-1975.
- 150) Samar, S.C. (2018). Analyse de l'aérogologie locale dans la région de Beyrouth durant la période estivale, Actes de la conférence internationale InterCaro. *InterGIS*, 24(2), 281–291
- 151) Scott, J. L., Kraemer, D. G., & Keller, R. J. (2009). Occupational hazards of carbon dioxide exposure. *Journal of Chemical Health & Safety*, 16(2), 18-22.
- 152) Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., ... & Masson, V. (2011). The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976-991.
- 153) Sellami, M., Dahech, S. et Charfi, S. (2021). Variation spatiotemporelle de l'ozone troposphérique à Bizerte, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 34, en distanciel à l'Université Hassan II de Casablanca et F.L.S.H. de Mohammedia, Maroc, 437-442

- 154) Sellami, M., Dahech, S. et Charfi, S. (2022). Brises thermiques à Bizerte : approche multiscalaire, *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 35, Centre Internationale de Conférences de Météo-France, Toulouse, France, 90-96.
- 155) Sellami, M., Dahech, S. et Charfi, S. (2023). Types de temps estivaux, sirocco et brises thermiques à Bizerte, *Publications de l'Association internationale de climatologie*, 36, Université de Bucarest / Faculté de Géographie, Bucarest, Roumanie, 245-248
- 156) Slama, M. (1998). L'influence des paramètres climatiques sur la pollution de l'air à Tunis. *Mémoire de DEA, Université de Tunis*.
- 157) Talbi, A. (2021). *Étude de la pollution de l'air par les particules fines, en milieu trafic routier et urbain, à Alger* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Polytechnique), 90.
- 158) Thouron, L. (2017). *Modélisation dynamique multi-échelle de la pollution atmosphérique en milieu urbain* (Doctoral dissertation, Université Paris-Est), 157.
- 159) Traboulsi, M., et Ben Boubaker, H. (2012). Fortes chaleurs et circulation atmosphérique associée autour de la Méditerranée orientale : cas du littoral tunisien et syro-libanais. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*, (14-15), 106-119.
- 160) Tsujita, W., Yoshino, A., Ishida, H., & Moriizumi, T. (2005). Gas sensor network for air-pollution monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 110(2), 304-311.
- 161) European Union. (2015). Commission Directive (EU) 2015/1480 of 28 August 2015 Amending Several Annexes to Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council Laying Down the Rules Concerning Reference Methods, Data Validation and Location of Sampling Points for the Assessment of Ambient air Quality. *Off. J. Eur. Union*, 226.
- 162) UE (Union Européenne), 2017. Etude d'impact de la pollution industrielle sur l'économie de la région de Gabès, Rapport final Version définitive du 30 Décembre 2017, 140 p
- 163) UN (United Nations). (2021). United Nations Environmental Plan, 22<sup>nd</sup> meeting of the Contracting Parties to the Convention for the Protection of the Marine Environment and the Coastal Region of the Mediterranean and its Protocols Antalya, Turkey, 7-10 December 2021
- 164) Valentin, C. (1994). Sécheresse et érosion au Sahel. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 5(3), 191-198.

- 165) Vigneau, J. P. (1986). Climat et climats des Pyrénées orientales, *JPV éd.*, 618 p
- 166) Wu, S., Wang, Y., Chen, C., Cao, Z., Cao, J., Yu, Z., & Song, H. (2021). Valley city ventilation under the calm and stable weather conditions: a review. *Building and Environment*, 194, 107668.
- 167) Yoshino, M. M. (1975). *Climate in a small area: an introduction to local meteorology*, 549, Tokyo: University of Tokyo press.
- 168) You, C., Chi-Hung Fung, J., & Tse, W. P. (2019). Response of the sea breeze to urbanization in the Pearl River Delta Region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(7), 1449-1463.
- 169) Zeinaldine, R., & Dahech, S. (2023). Topoclimatic characteristics of Zahlé (Eastern Lebanon): Thermal breezes and urban heat island phenomenon—Preliminary results. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-24.

## **WEBOGRAPHIE :**

- 1) [anpe.shinyapps.io/o3\\_final/](http://anpe.shinyapps.io/o3_final/) (Lien cassé)
- 2) [earth.google.com](http://earth.google.com) (et application sur ordinateur)
- 3) [ecologie.gouv.fr](http://ecologie.gouv.fr)
- 4) <https://perspective.usherbrooke.ca/>
- 5) <https://www.cchst.ca/>
- 6) <https://www.commune-bizerte.gov.tn/>
- 7) <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>
- 8) <http://www.eea.europa.eu/themes/air/airbase>
- 9) <http://www.epa.gov/ttn/airs/airsaqs/>
- 10) <http://www.teledyne-api.com/>
- 11) <https://citet.nat.tn/>
- 12) <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- 13) <https://mareespeche.com/tn/tunisia/bizerte>
- 14) <https://meersens.com/>
- 15) <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- 16) <https://search.earthdata.nasa.gov/search/>
- 17) <https://svs.gsfc.nasa.gov/>

- 18) <https://visibleearth.nasa.gov/search?q=Dust+storm+over+the+Mediterranean+Sea>
- 19) <https://www.businessnews.com.tn/grand-tunis--vents-forts-et-visibilite-quasi-nulle,520,131528,3>
- 20) <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/rsqaq-donnees-horaires-continues>
- 21) <https://www.google.com/maps>
- 22) <https://www.science.gov/topicpages/a/africa+dust+storms>
- 23) <http://srtm.csi.cgiar.org>
- 24) <https://www.unep.org/unepmap/fr/what-we-do>
- 25) [kapitalis.com/tunisie/2020/02/21/bizerte-demarrage-du-projet-de-protection-de-la-corniche-contre-lerosion-marine/](http://kapitalis.com/tunisie/2020/02/21/bizerte-demarrage-du-projet-de-protection-de-la-corniche-contre-lerosion-marine/)
- 26) [mesonet.agron.iastate.edu](http://mesonet.agron.iastate.edu)
- 27) [meteofrance.com](http://meteofrance.com)
- 28) [omer7a.obs-mip.fr/malette/fiches/Distribution-des-polluants-echelles-de-la-pollution-atmospherique.html](http://omer7a.obs-mip.fr/malette/fiches/Distribution-des-polluants-echelles-de-la-pollution-atmospherique.html)
- 29) [twitter.com/MeteoFrance\\_SE](https://twitter.com/MeteoFrance_SE)
- 30) [www.actu-environnement.com](http://www.actu-environnement.com)
- 31) [www.aemet.es/fr](http://www.aemet.es/fr)
- 32) [www.agate-france.com](http://www.agate-france.com)
- 33) [www.aires-mediterranee.org/](http://www.aires-mediterranee.org/)
- 34) [www.airparif.asso.fr/](http://www.airparif.asso.fr/)
- 35) [www.anpe-tunair.tn](http://www.anpe-tunair.tn)
- 36) [www.atmo-nouvelleaquitaine.org](http://www.atmo-nouvelleaquitaine.org)
- 37) [www.atmosud.org](http://www.atmosud.org)
- 38) <https://unric.org/>
- 39) [www.centreantipoisons.be/monoxyde-de-carbone/le-monoxyde-de-carbone-co-en-detail/quelles-sont-les-concentrations-toxiques-de](http://www.centreantipoisons.be/monoxyde-de-carbone/le-monoxyde-de-carbone-co-en-detail/quelles-sont-les-concentrations-toxiques-de)
- 40) [www.collectiviteslocales.gov.tn/wp-content/uploads/2017/06/PGES-mateur.pdf](http://www.collectiviteslocales.gov.tn/wp-content/uploads/2017/06/PGES-mateur.pdf)
- 41) [www.dcceew.gov.au](http://www.dcceew.gov.au)
- 42) [www.infoclimat.fr](http://www.infoclimat.fr)
- 43) [www.ins.tn/](http://www.ins.tn/)
- 44) [www.letemps.news/2022/09/08/travaux-dequipement-bizerte-passee-au-peigne-fin/](http://www.letemps.news/2022/09/08/travaux-dequipement-bizerte-passee-au-peigne-fin/)
- 45) [www.meteoblue.com](http://www.meteoblue.com)
- 46) [www.meteociel.fr](http://www.meteociel.fr)

- 47) [www.ncei.noaa.gov/maps/daily/](http://www.ncei.noaa.gov/maps/daily/)
- 48) [www.ncei.noaa.gov/maps/hourly/](http://www.ncei.noaa.gov/maps/hourly/)
- 49) [www.ouest-france.fr](http://www.ouest-france.fr)
- 50) [www.scalair.nc](http://www.scalair.nc)
- 51) [www.wallonair.be](http://www.wallonair.be)
- 52) [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)
- 53) [www.who.int](http://www.who.int)
- 54) [www.wwf.fr](http://www.wwf.fr)

# Summary

## Weather and air pollution in Bizerte :

### Multiscalar analysis

The evolution of pollutant concentrations at different spatiotemporal scales is dictated by different parameters including meteorology, topography, land use, socio-economic behavior, as well as land use planning and equipment.

The climate of the Bizerte area is mild and sunny Mediterranean. It represents one of the most important industrial centers in Tunisia. Anthropogenic activities (industrial environment, road traffic, socio-economic behavior and habits) coupled with the climatic and topographical conditions which characterize Bizerte have largely contributed to transformations, sometimes major, in the quality of its air.

With a single urban station for measuring air pollution in Bizerte, the resulting data cannot be sufficient to effectively interpret and analyze the situation in an area as large and contrasting as that of the agglomeration of Bizerte and its surroundings. of influence by pollutants. For this reason, we have opted to exploit the maximum available data by enriching it with different traveling measurement campaigns, the installation of pollutant sensors as fixed stations and the installation of automatic weather stations covering the years 2020 until to 2023, especially during the hot season June to August with September).

Overall, three types of weather could be identified: (1) A first type of weather with a very hot atmosphere which represents 26.9% of the total number of observations, (2) A second type of weather which represents 37.6%, less hot and (3) a third type of cooler weather which represents 35.5% of cases during the hot seasons of the period 1990-2022. Throughout these types of weather, thermal breezes are very active and very frequent, particularly during the hot season and to a lesser degree on sirocco and sand storms days (which remain an aggravating factor in atmospheric pollution).

The proximity of the sea and the cornice line is highly sought after to escape the summer heat. Despite their soothing nature, as well as the well-being they offer, certain popular places are also polluted because of high traffic, but also due to favorable topographical, meteorological and development characteristics.

In order to quantify and better understand the intervening factors acting in the different configurations of the relationship between the type of weather and atmospheric pollution, the contribution of the multiplication of meteorological stations and pollutant sensors is indisputable for research and others. areas of application This will also make it possible to properly address the question of statistical, cartographic and multiscalar modeling (from a spatiotemporal point of view) of this relationship. The results will be of great use to the various users: researchers, planners, decision-makers, but also at the level of the citizen who has the right to real, timely and popularized information.

**Keywords:** Types of weather, Thermal breezes, Sirocco, Atmospheric pollution, Spatio-temporal and multiscalar variability

## ملخص

### الطقس والتلوث الهوائي ببزرت:

#### تحليل متعدد المستويات

إن تطور تركيزات الملوثات على مستويات زمانية مكانية مختلفة تمليه معايير مختلفة بما في ذلك الأرصاد الجوية، والتضاريس، واستخدام الأراضي، والسلوك الاجتماعي والاقتصادي، فضلا عن تخطيط استخدام الأراضي والمعدات.

مناخ منطقة بنزرت متوسطي معتدل ومشمس. يمثل أحد أهم المراكز الصناعية في تونس. الأنشطة البشرية (البيئة الصناعية، حركة المرور، السلوك والعادات الاجتماعية والاقتصادية) إلى جانب الظروف المناخية والطبوغرافية التي تميز بنزرت ساهمت إلى حد كبير في التحولات، وأحيانا كبيرة، في نوعية الهواء.

مع وجود محطة حضرية واحدة لقياس تلوث الهواء في بنزرت، لا يمكن أن تكون البيانات الناتجة كافية لتفسير وتحليل الوضع بشكل فعال في منطقة كبيرة ومتناقضة مثل منطقة بنزرت وضواحيها من حيث تأثير الملوثات. ولهذا السبب اخترنا استغلال الحد الأقصى من البيانات المتاحة من خلال إثنائها بحملات قياس متنقلة مختلفة وتركيب أجهزة استشعار للتلوث كمحطات ثابتة وتركيب محطات أرصاد جوية أوتوماتيكية تغطي خصوصا صيف عام 2020.

بشكل عام، تم تحديد ثلاثة أنواع من الطقس خلال الفترة 1990-2022: (1) نوع أول من يتميز بجو حار جداً يمثل 26,9% من إجمالي عدد البيانات، (2) نوع ثان من الطقس يمثل 37,6% من البيانات أقل حرارة من الأول (3) ثم نوع ثالث في 35,5% من الحالات يتميز بدرجات حرارة أطف. خلال هذه الأنواع من الطقس، تكون النسائم الحرارية نشطة ومتكررة، خاصة خلال الفصل الحار وبدرجة أقل في أيام رياح الشهيلي والرياح الرملية (التي تظل عاملاً مفاقماً للتلوث الهوائي).

يمثل القرب من البحر وخط الكورنيش أماكن يقصدها الناس للهروب من حرارة الصيف. على الرغم من طابعها اللطيف، فضلاً عن الرفاهية التي توفرها، فإن بعض الأماكن التي يرتادها الناس ملوثة أيضاً بسبب ارتفاع نسبة الارتياح، ولكن أيضاً بسبب الخصائص الطبوغرافية والأرصاد الجوية والبنية التحتية الملائمة.

من أجل التحديد الكمي والفهم الأفضل للعوامل المتداخلة في الأنماط المختلفة للعلاقة بين نوع الطقس والتلوث الهوائي، فإن مساهمة تعدد محطات الأرصاد الجوية وأجهزة استشعار الملوثات في مجال البحث ومجالات التطبيق الأخرى لا يمكن إنكارها حيث تجعل من الممكن معالجة مسألة النمذجة الإحصائية والخرائطية ومتعددة المستويات (من وجهة النظر الزمانية والمكانية) لهذه العلاقة بشكل صحيح. ستكون النتائج ذات فائدة كبيرة لمختلف المستخدمين: الباحثين والمخططين وصانعي القرار، ولكن أيضاً في مستوى المواطن الذي له الحق في الحصول على معلومات صحيحة وفي الوقت المناسب وبمبسطة.

**الكلمات المفاتيح :** أنواع الطقس، النسائم الحرارية، الشهيلي، التلوث الهوائي، التغيرات المكانية والزمانية ومتعددة المستويات

## Résumé

### Temps et pollution atmosphérique à Bizerte :

#### Analyse multiscalaire

L'évolution des concentrations des polluants à différentes échelles spatiotemporelles est dictée par différents paramètres incluant la météorologie, la topographie, l'occupation du sol, le comportement socio-économique, ainsi que l'aménagement et l'équipement du territoire.

Le climat de la zone de Bizerte est de type méditerranéen doux et ensoleillé. Elle représente l'un des plus importants pôles industriels de la Tunisie. Les activités anthropiques (environnement industriel, trafic routier, comportement et habitudes socio-économiques) couplées avec les conditions climatiques et topographiques qui caractérisent Bizerte ont contribué largement à des transformations, parfois majeurs, dans la qualité de son air.

Avec une seule station urbaine de mesure de la pollution atmosphérique à Bizerte, les données qui en découlent ne peuvent pas être suffisantes pour interpréter et analyser efficacement la situation dans un espace aussi large et contrasté que celui de l'agglomération de Bizerte et de son milieu d'influence par les polluants. Pour cette raison, nous avons opté à exploiter le maximum de données disponibles en les enrichissant par différentes campagnes de mesures semi-itinérantes, l'installation de capteurs de polluants en tant que stations fixes et l'installation de stations météorologiques automatiques couvrant les années 2020 jusqu'à 2023, notamment pendant la saison chaude juin à août avec septembre).

Globalement, trois types de temps ont pu être identifiés : (1) Un premier type de temps avec une ambiance très chaude qui représente 26,9% du nombre total des observations, (2) Un deuxième type de temps qui fait 37,6%, moins chaud et (3) un troisième type de temps plus frais qui représente 35,5% des cas pendant les saisons chaudes de la période 1990-2022. A travers ces types de temps, les brises thermiques sont très actives et très fréquentes notamment pendant la saison chaude et d'un degré moindre les jours de sirocco et de vents de sable (qui restent un facteur aggravant de la pollution atmosphérique).

La proximité de la mer et de la ligne de corniche est très recherchée pour fuir la chaleur estivale. Malgré leur caractère adoucissant, ainsi que le bien être qu'ils offrent, certains lieux fréquentés sont aussi pollués à cause d'une fréquentation importante, mais aussi dû aux caractéristiques topographiques, météorologiques et d'aménagement favorables.

Afin de quantifier et de mieux cerner les facteurs intervenants agissant dans les différentes configurations de la relation entre les type de temps et la pollution atmosphérique, l'apport de la multiplication des stations météorologiques et des capteurs des polluants est incontestable pour la recherche et les autres domaines d'application. Ceci permettra aussi d'aborder convenablement la question de la modélisation statistique, cartographique et multiscalaire (d'un point de vue spatiotemporel) de cette relation. Les résultats seront d'une grande utilité pour les différents utilisateurs : chercheurs, aménagistes, décideurs, mais aussi au niveau du citoyen qui a le droit à une information réelle, à temps et vulgarisée.

**Mots clés :** Types de temps, Brises thermiques, Sirocco, Pollution atmosphérique, Variabilité spatio-temporelle et multiscalaire