



HAL
open science

Production d'eau potable par condensation passive de l'humidité atmosphérique (rosée)

Imad Lekouch

► **To cite this version:**

Imad Lekouch. Production d'eau potable par condensation passive de l'humidité atmosphérique (rosée). Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI; Université Ibn Zohr, Agadir, 2010. Français. NNT : . pastel-00547593

HAL Id: pastel-00547593

<https://pastel.hal.science/pastel-00547593>

Submitted on 16 Dec 2010

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.

**THESE DE DOCTORAT EN COTUTELLE
L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE
ET
L'UNIVERSITE IBNOU ZOHR D'AGADIR**

Spécialité

(Géosciences et Ressources Naturelles)

Présentée par

M. Imad LEKOUCH

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

**PRODUCTION D'EAU POTABLE PAR CONDENSATION
PASSIVE DE L'HUMIDITÉ ATMOSPHERIQUE (ROSÉE)**

Soutenue le 23/02/2010

Devant le jury composé de :

- M. Belkacem KABBACHI : Professeur à l'Université Ibn Zohr d'Agadir (Président)
M. Daniel BEYSENS : HDR au CEA-ESEME, ESPCI-PMMH (Directeur de thèse)
Marc MUSELLI : HDR Université de Corse - UMR CNRS 6134 (Codirecteur de thèse)
M. Jalil OUZZANI : HDR - Directeur scientifique ArcoFluid à Bordeaux (Rapporteur)
M. Etienne DUGUET : HDR à l'ICMCB de l'Université Bordeaux 1 (Rapporteur)
M. Mohammed EL YOUSSE : Professeur à l'Université Med V-Agdal, Rabat (Rapporteur)
M. Mohammed BENSSAOU : Professeur à l'Université Ibn Zohr d'Agadir (Examinateur)
M. Abdelkrim EZAIDI : Professeur à l'Université Ibn Zohr d'Agadir (Examinateur)

Remerciements

Bien qu'étant un effort personnel, un travail de thèse ne peut aboutir sans l'aide d'un certain nombre de personnes. Je remercierai toutes celles sans qui cette thèse ne serait pas ce qu'elle est (aussi bien par les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec eux, leurs suggestions ou contributions). Et je remercierai aussi toutes les personnes que j'ai pu rencontrer. Le nombre de personnes qui ont rendu ces années de thèse agréables n'a fait que croître au fil des années. Si j'oublie une personne dans cet exercice, et je le ferai sans doute, je m'en excuse d'avance.

Je remercie en premier lieu mes directeurs de thèse, Monsieur Daniel BEYSENS et Monsieur Belkacem KABACHI à la fois pour leur suivi attentif et leurs conseils avisés. Leurs orientations portent leurs fruits aujourd'hui avec ce travail. Ma respectueuse gratitude à Daniel de m'avoir accueilli à l'ESPCI de Paris et pour son soutien, son encadrement et les conseils qu'il a toujours su me prodiguer tout au long de ce travail.

Je tiens aussi à remercier le Professeur Marc MUSELLI pour avoir accepté de co-encadrer cette thèse et aussi de m'avoir accueilli au laboratoire «Système physiques de l'environnement » à Ajaccio. Je sais qu'il a pris sur son temps libre pour lire, relire et corriger mes travaux, ce qui ne peut qu'augmenter l'estime que je lui porte.

Il m'est agréable aussi de remercier Monsieur Pierre ROGNON pour ces conseils. Il a su manifester une grande patience à mon égard et un vif intérêt pour ma carrière scientifique, qu'il a ponctué par ses remarques empreintes de toute son expérience scientifique et de ses parfaites connaissances.

Je désire également remercier le Professeur Jallil OUZZANI pour tous ses efforts pour son encadrement pendant mon séjour à Bordeaux. Je remercie aussi Monsieur Yves GARRABOS et son équipe qui m'ont bien accueilli au sein de l'ICMCB.

J'exprimerais aussi toute ma sympathie et mes remerciements au Docteur Owen CLUS. Il a toujours été ouvert à toutes mes questions pour mon stage à Vignola. La collaboration efficace de l'OPUR m'a beaucoup aidé à réaliser ce travail, merci à Irene MILIMOUK-MELNYTCHUK, Marc DURAND et Céline EUDIER et tous les membres d'OPUR.

Je remercie les rapporteurs de cette thèse Monsieur Mohammed EL YOUSSE, Monsieur Jallil OUZZANI, Monsieur Etienne DUGUET. Aussi, je remercie Monsieur Abdelkarim ZAIDI et Monsieur Mohamed BENSOU et les autres membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

La qualité et la continuité des données utilisées ici sont le fruit d'un travail d'équipe sur le terrain et de maintenance soutenue de la station de Mirleft. J'ai pour cela pleinement profité de la présence des autorités locale de Mirleft au nom du président de la commune Monsieur BOUAGOU et de l'association IMARJAN d'Idoussksou (Mouhamed LUNFOURME).

Je tiens à souligner les moments passés avec mes amis à l'université d'Agadir, Soufian, Driss, Tarik et Abdslam, qui ont parcouru avec moi un bout ou entièrement le chemin de la thèse. Et je souhaite avec beaucoup de courage aux prochains thésards qui suivent.

J'ai gardé pour la fin ceux qui me sont les plus chers : ma famille. Je pense tout d'abord à mes parents qui m'ont toujours fait confiance et qui m'ont appris à me donner le meilleur de moi-même. Je suis très reconnaissant à mon frère Khalid qui m'a fourni une aide considérable pour la compréhension des phénomènes physiques. Je pense aussi à mes frères Mehdi, Majid et Yassine qui ont pris en charge une partie de mon travail de terrain au Maroc et durant mon séjour en France. Je pense également à ma femme, mes sœurs, mes cousins, neveux, oncles. Pour tous, mes pensées dépassent largement les mots, alors tout simplement Merci.

Résumé :

Le travail de thèse a pour objectif d'estimer précisément la quantité d'eau que l'on peut espérer collecter par la rosée dans le village côtier de Mirleft, situé au sud d'Agadir (Maroc), de la comparer aux autres ressources renouvelables de récupération d'eau douce (brouillard, pluie) et d'estimer sa qualité. La mise en place à Mirleft d'une station météorologique, de 4 condenseurs et d'un filet à brouillard a permis d'obtenir des données concernant la période comprise entre le 01/05/2007 et le 31/04/2008. De très nombreux événements de rosée ont été observés, avec de rares événements de brouillard. L'eau de rosée représente 40 % de l'apport annuel en pluie et apparaît donc comme une composante essentielle de l'apport hydrique total. Une approche mathématique de la modélisation de la rosée a estimé son rendement sur une quinzaine de sites répartis sur tout le territoire du Maroc. Une analyse spatio-temporelle a permis une meilleure connaissance du phénomène de la condensation à l'échelle du Maroc. Concernant les analyses chimiques, les pH moyens de la rosée et de la pluie sont respectivement égaux à 7,40 (± 0.28) et 6,85 (± 0.21) avec une conductivité moyenne de 727,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (± 678.64) et 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (± 306.07), représentant une minéralisation totale de 560 mg L^{-1} et 230 mg L^{-1} . Dans cette étude, le rapport TA/TC, inférieur à 1, indique la nature alcaline de ces eaux. L'analyse des ions majeurs a montré que la concentration du Cl^- et Na^+ est élevée par rapport à celle des autres éléments. Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur les données afin d'identifier l'origine possible des ions. Pour estimer la contribution marine et non marine de ces ions, la fraction du sel provenant de la mer (SSF) a été calculé. Les faibles pourcentages du SSF de la rosée ont suggéré une contribution considérable d'origine non marine pour des composants comme Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} et NO_3^- exceptés le Cl^- , Na^+ et Mg^{2+} . Par contre dans l'eau de pluie, les valeurs du NSSF (No Sea Salt Fraction) indiquent que seulement Ca^{2+} et NO_3^- ne sont pas influencés par la mer. L'étude du facteur de neutralisation a révélé l'ordre décroissant des cations dans l'eau des deux sources $\text{NF}_{\text{Ca}^{2+}} > \text{NF}_{\text{Mg}^{2+}} > \text{NF}_{\text{K}^+}$. On a constaté l'influence du climat sur la chimie de la rosée et par conséquent les variations temporelles où les saisons de transition et sèches sont plus concentrées en éléments que la saison humide caractérisée par les taux élevés en eau de rosée. Les quantités d'ions mesurées et les analyses biologiques montrent que l'eau de rosée est potable vis-à-vis des recommandations de l'OMS. Les résultats en termes de rendements associés aux analyses chimiques de l'eau de rosée et le succès du condenseur de démonstration dans différentes régions où notre équipe a réalisé ces recherches nous ont incité à équiper avec succès des grands systèmes de collectes à Idoussksou (8 km SE de Mirleft) pour l'usage de la population locale.

Mots clés : Formation de rosée, condenseur radiatif passif, hydrométéorologie, chimie de la rosée, chimie de la pluie, zonalité climatique.

Abstract :

The work of thesis has for objective to estimate exactly the quantity of water potentially produced by dew in the village of Mirleft in the South of Agadir (Morocco), to compare it with the other alternative resources of water collection (fog, rain) and estimate its quality. The implementation at Mirleft of a meteorological station, 4 condensers and a net with fog allowed obtaining data concerning the period between 05/01/2007 and the 04/31/2008. Very numerous events of dew were observed, with rare events of fog. The dew water represents 40 % of the annual contribution of rain and thus appears as an essential component in the whole water balance. A mathematical approach to modeling the dew has been used to estimate dew yield over a dozen sites scattered throughout the territory. A spatio-temporal analysis allowed a better understanding of the phenomenon of condensation across Morocco. The average pH of the dew and the rain are respectively equal at 7.40 (± 0.28) and 6.85 (± 0.21) with an average conductivity of 727.25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (± 678.64) and 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (± 306.07), representing a total mineralization of 560 mg L^{-1} and 230 mg L^{-1} . In this study, the ratio TA/TC, lower than 1, indicates the alkaline nature of these waters. The analysis of the major ions showed that the concentration of Cl^- and Na^+ are raised with regard to that of the other elements. An analysis in main constituent (ACP) was realized on the data to identify the possible origin of the ions. To estimate the contribution marine or not marine of these ions, the fraction of the salt resulting from the sea (SSF) was calculated. The weak percentages of the SSF of the dew suggested a considerable contribution of not marine origin for constituents such as Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} and NO_3^- Cl^- , Na^+ and Mg^{2+} . On the other hand in the rainwater, the values of the NSSF (No Sea Salt Fraction) indicate that only Ca^{2+} and NO_3^- are not influenced by the sea. The study of the neutralization factor revealed the decreasing order of the cations in the water of both sources $\text{NF}_{\text{Ca}^{2+}} > \text{NF}_{\text{Mg}^{2+}} > \text{NF}_{\text{K}^+}$. We noticed the influence of the climate on the chemistry of the dew and consequently the temporal variations where the seasons of transition and sandbanks are more concentrated in elements than the wet season characterized by high rates in dew water. The quantities of ions measured and biological analysis agrees with the World Health Organization requirements for potable water. The results in terms of yields associated with chemical analysis of dew and the successful demonstration of the condenser in different areas where our team has done this research led us to equip successful collection systems to Idoussksou.

Keywords : Dew formation, radiative condenser, hydrometeorology, dew and rain chemistry, temporal variation, sources of ions, factor of neutralization, climatic areas.

Sommaire

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

Chapitre I : Ressource en eau et climat au Maroc

I.1 Introduction.....	6
I.2 Ressources en eau.....	8
I.2.1 Ressources en eau de surface	8
I.2.2 Ressources en eaux souterraines.....	9
I.2.3 Ressources en eaux non conventionnelles.....	11
I.2.3.1 Eaux usées.....	12
I.2.3.2 Dessalement d'eau de mer	12
I.3 Raréfaction et surexploitation des ressources en eau.....	12
I.4 Climat au Maroc et son impact sur les ressources en eau	14
I.4.1 Le relief.....	15
I.4.2 Précipitations.....	15
I.5 Cas du bassin hydrologique de Souss Massa.....	19
I.5.1 Situation géographique	19
I.5.2 Climatologie du bassin	19
I.5.2.1 Les précipitations du bassin	19
I.5.2.2 Les températures du bassin.....	20
I.5.2.3 Aridité du bassin.....	24
I.5.2.4 L'humidité relative du bassin.....	25
I.5.2.5 La vitesse et la direction du vent du bassin.....	29
I.5.2.6 Le brouillard.....	32
I.6 Conclusion	34

Chapitre II : Données climatiques et analyse physiques

II.1 Introduction	35
II.2 Bases de données météorologiques	36
II.2.1 L'humidité de l'air	36
II.2.1.1 L'humidité relative.....	36
II.2.1.2 L'humidité absolue.....	37
II.2.2 La température	37
II.2.2.1 La température ambiante (T_a).....	37
II.2.2.2 La température de rosée (T_d).....	38
II.2.2.3 La température de surface du condenseur (T_c).....	38
II.2.3 Le vent	38
II.2.4 La nébulosité	39
II.3 Bases physiques entrant en jeux dans la condensation	39
II.3.1 Rayonnements naturels	39
II.3.1.1 Les généralités	39
II.3.1.2 Le rayonnement solaire.....	41

II.3.1.3 Le rayonnement atmosphérique	41
II.3.1.4 Le rayonnement terrestre	42
II.3.1.5 Le rayonnement net	42
II.3.2 Échange de flux entre la surface et l'atmosphère	43
II.3.2.1 Le bilan d'énergie.....	43
II.3.2.2 Le cycle de l'eau	44
II.4 La formation de la rosée	46
II.4.1 Le refroidissement radiatif	47
II.4.2 La condensation de la vapeur d'eau.....	47
II.4.3 Transferts thermiques au niveau du condenseur.....	50
II.4.3.1 Modèle d'estimation de la rosée.....	51
II.5 La rosée, source d'eau potable.....	54
II.5.1 Les condenseurs de rosée.....	54
II.5.1.1 Les condenseurs aériens massifs.....	55
II.5.1.2 Les condenseurs aériens radiatifs.....	58
II.6. La formation du brouillard	59
II.6.1 Capteurs de brouillard	61
II.6 Conclusion.....	63

Chapitre III : Expérience ; Instrumentation et Méthodologie

III.1 Introduction.....	64
III.2 Les méthodes de mesures.....	65
III.2.1 Le condenseur standard	65
III.2.2 Films polymères (Foil).....	66
III.2.2.1 Propriétés du film	67
III.2.3 La station météorologique.....	68
III.2.3.1 Les capteurs	68
III.2.3.3 Interface informatique Weatherlink.....	71
III.3 Application de l'analyse statistique.....	72
III.3.1 Objectif et démarches.....	72
III.3.2 Analyse factorielle en composante principale	73
III.3.3 Classification hiérarchique	74
III.4 Estimation du taux de condensation.....	75
III.4.1 Méthode physique.....	75
III.4.2 Réseaux de neurones	75
III.4.2.1 Présentation de la méthode neuronale	75
III.4.2.2 Connexions entre les neurones	76
III.4.2.3 Critères de performance du modèle.....	77
III.5 Simulation numérique.....	78
III.6 Analyse physico-chimique de la rosée	78
III.7 Conclusion	80

Chapitre IV : La rosée dans la région de Mirleft

IV.1 Introduction	81
IV.2 Présentation de la région d'étude	82
IV.3. Caractérisation des données climatiques	86
IV.3.1 La température ambiante (T_a) et de rosée (T_d).....	86
IV.3.2 Humidité relative (RH).....	89
IV.3.3 La vitesse et la direction du vent (V).....	91
IV.3.4 La nébulosité (N).....	95
IV.4 Les événements de rosée, de brouillard et de pluie.....	97
IV.4.1 Rosée, brouillard et pluie à Mirleft.....	97
IV.4.2 Rosée et brouillard à Idouasskssou.....	100
IV.5 Paramètres entrant en jeu dans le phénomène de rosée.....	101
IV.5.1 L'humidité relative (RH %)	103
IV.5.2 La couverture nuageuse N (octas).....	104
IV.5.3 La vitesse du vent V (m/s).....	105
IV.5.4 Relation entre V , RH, h et la direction du vent	106
IV.5.5 La température de surface	108
IV.6 Analyse statistique.....	110
IV.6.1 La complémentarité entre l'ACP et la CHA.....	110
IV.6.2 Les résultats de l'analyse statistique	111
IV.6.3 Description des classes.....	114
IV.7 Modèles d'estimation de la rosée	117
IV.7.1 Modèle physique (OPUR).....	117
IV.7.2 Modèle réseau de neurone	118
IV.7.2.1 Architecture du réseau	119
IV.7.2.2 Collecte des données	120
IV.7.2.3 Résultats et discussions.....	120
IV.8 Estimation du taux de condensation dans les régions marocaines.....	127
IV.8.1 Cartographie de la rosée	127
IV.8.1.1 Les données météorologiques à disposition.....	127
IV.8.1.2 Carte de la rosée et de l'humidité relative	127
IV.9 Simulation numérique.....	132
IV.9.1 Le logiciel PHOENICS	132
IV.9.2 Méthodologie.....	133
IV.9.3 Description des cas simulés	134
IV.9.3.1 Influence du vent.....	135
IV.9.3.2 Influence du rayonnement thermique émis par l'atmosphère	136
IV.10 Conclusion.....	138

Chapitre V : Analyse physico-chimique de l'eau de rosée

V.1 Introduction.....	140
V.2 Description des données	142
V.2.1 Caractéristiques géochimiques de l'eau de rosée et de pluie	142
V.2.2 Les analyses statistiques.....	142

V.2.3 Validité des données de terrain (balance ionique)	143
V.2.4 Les éléments caractéristiques de la rosée et de la pluie	143
V.3 Synthèse des analyses faites sur la rosée et la pluie	144
V.3.1 Analyse physico-chimique.....	144
V.3.2 Le pH de la rosée et de la pluie	145
V.3.3 La conductivité de la rosée et de la pluie.....	149
V.3.4 La concentration ionique de l'eau de rosée et de pluie	150
V.4 Variations temporelles des concentrations ioniques.....	152
V.4.1 Variations mensuelles	153
V.4.2 Variations saisonnières	157
V.5 Origine des éléments chimiques dans l'eau de rosée et de pluie	159
V.5.1 Relation entre les éléments chimiques	159
V.5.1.1 Matrices de corrélation	159
V.5.1.2 Analyses factorielles	162
V.5.2 Estimation de la contribution marine.....	165
V.5.3 Facteur de neutralisation	166
V.6 Influence du climat sur la composition chimique de la rosée.....	167
V.6.1 Influence du dt , du volume de la rosée et la vitesse du vent.....	167
V.6.2 Zonalité climatique de la rosée	171
V.6.2.1 la rosée de Mirleft, de Zadar (Croatie) et Bordeaux (France).....	171
V.6.2.2 Les rétros-trajectoires des masses d'air	172
V.7 Analyse biologique de la rosée.....	177
V.8 Conclusion.....	178

Chapitre VI : Plateforme de démonstration à Idousskssou

VI.1 Introduction.....	180
VI.2 Les systèmes de collecte	182
VI.2.1 Site.....	182
VI.2.2 Installation	182
VI.2.2.1 Condenseur Terrasse (40,64 m ²).....	182
VI.2.2.2 Condenseur toiture double-pente (21,2 m ²)	185
VI.2.2.3 Condenseur sur terre plein (73,8 m ²)	186
VI.2.2.4 Mesures partielles de rosée	187
VI.2.2.5 Filet à brouillard (40,0 m ²)	189
VI.3 Conclusion	190
Conclusion générale.....	192
Références bibliographiques	194
Annexe.....	202

Introduction générale

Que nous dit la science d'aujourd'hui sur les origines de la Vie et sur le rôle qu'a pu y jouer l'eau ? Tout d'abord, nous savons par les études des astronomes sur l'Univers et celles des géologues sur notre planète que celle-ci, avec le reste du système solaire, s'est condensée, il y a quelque 4 milliards 600 millions d'années, d'un nuage de gaz et de poussières, en une masse extrêmement chaude, originellement liquide, dont la surface, en se refroidissant, forma une croûte percée de volcans d'où la vapeur d'eau s'échappait à grandes bouffées. L'eau liquide, qui ne pouvait subsister à l'origine à cause de la chaleur, n'apparut que lorsque le refroidissement permit la condensation de cette vapeur. Elle retomba alors en déluge et couvrit la planète d'océans où se déposèrent les sédiments arrachés par les flots. Naturellement, ce raccourci couvre quelques centaines de millions d'années. Autour de cette Terre inondée subsistait sensiblement l'atmosphère primitive qui contenait essentiellement, en plus des gaz, de la vapeur d'eau.

Actuellement, la pénurie d'eau (aridité) et sa fluctuation dans le temps (sécheresse/désertification) affectent tout particulièrement les écosystèmes puisque l'eau est un facteur particulièrement limitant des zones arides et semi-arides. La sécheresse bien qu'elle puisse être persistante est un risque limité dans le temps, mais qui agit directement sur l'ensemble du milieu puisque son impact se transmet de la pluie (sécheresse climatique) au sol (sécheresse édaphique) aux produits de la terre (sécheresse agricole par exemple) et aux nappes phréatiques (sécheresse hydrologique). S'ajoute à ces problèmes naturels, l'accroissement démographique rapide, couplé à la fois à l'industrialisation, l'urbanisation, l'intensification agricole et les modes de vie de plus en plus consommateurs d'eau entraînant une crise mondiale et des conflits sur l'eau.

A l'échelle mondiale, 2,6 milliards de personnes (soit 40% de la population mondiale) n'ont pas accès à l'eau potable et à l'assainissement de base. Parmi elles, 1,5 milliard n'ont carrément pas accès à de l'eau simplement potable de façon durable. On estime que l'amélioration des conditions d'accès à l'eau potable, des services d'assainissement et de l'hygiène permettraient de sauver 1,6 million de vies chaque année, principalement des enfants. Au cours du 20ème siècle, alors que la population mondiale a été multipliée par trois, la consommation en eau a été multipliée par six.

"Notre capacité à satisfaire une demande planétaire toujours croissante dépendra d'une bonne gouvernance et d'une bonne gestion des ressources disponibles", indique un rapport de

l'ONU en date du 13 mars 2006. De plus, *"la qualité de l'eau est de moins en moins bonne dans la plupart des régions"*.

Les problèmes d'eau se situent dans les régions arides où la pluie est rare, dans les régions ayant peu de ressources souterraines en eau et dans les régions ne possédant que peu de cours d'eau exploitables pour la consommation humaine et l'irrigation. Pourtant, des solutions existent, elles sont adaptées à chaque région en pénurie. Il est possible de boire l'eau issue de la rosée, du brouillard, de réutiliser les eaux usées, de collecter les eaux de pluie. Les techniques sont diverses et en pleine expansion.

On peut « produire » de l'eau à partir de diverses sources et par différents moyens techniques. Quelle que soit la solution technique adoptée, le but est d'obtenir une eau en quantité suffisante, propre à la consommation humaine et accessible à tous, y compris et en particulier aux groupes les plus défavorisés.

Dans la région d'Agadir, une étude bibliographique préliminaire concernant les ressources hydriques montre que de sérieux problèmes d'eau touchent de larges zones rurales et en particulier l'alimentation d'établissements publics tels que les écoles ou les dispensaires. Dans le but d'explorer de nouvelles méthodes pour récupérer une eau de qualité pouvant être mise à disposition des populations, l'étude du phénomène de condensation radiative de la vapeur atmosphérique (rosée) a été entreprise. Le travail de thèse, qui s'effectue en collaboration entre l'Université Ibn Zohr d'Agadir (Maroc), l'équipe CEA/CNRS ESEME de Paris (France), l'équipe UMR CNRS de Corse (France) et l'Association OPUR (France) a donc pour objectif d'estimer la quantité d'eau douce que l'on espère "produire" par la rosée et le brouillard au sud d'Agadir, dans le village de Mirleft et des environs. La mise en place à Mirleft d'une station climatique, de 4 condenseurs et d'un filet à Brouillard a permis d'obtenir des données concernant la période allant du 01/05/2007 jusqu'au le 31/04/2008.

Une ressource alternative est à chercher tout simplement dans l'air où nous possédons de très grandes réserves d'eau non maîtrisées pas. Le constat est aisé, mais il faut pouvoir et savoir extraire cette eau sous forme liquide et de la façon la plus économique possible. Plusieurs voies sont explorées à ce jour pour exploiter cette ressource. La vapeur d'eau atmosphérique peut être condensée en eau liquide par l'utilisation de condenseurs passifs de rosée refroidis par dissipation radiative d'énergie. L'objectif de nos travaux est ainsi de créer une source d'eau d'appoint (voire principale durant la saison sèche et toute l'année dans certaines régions du globe) pour l'alimentation en eau potable d'une population isolée.

La première tentative documentée de construction d'un condenseur de rosée est attribuée à un ingénieur Russe, F.I. Zibold. En 1912 en Crimée (Ukraine), Zibold fit

construire une sorte de coupe d'environ 20 m de diamètre qui fut ensuite chargée de galets de 15 à 40 cm de diamètre. Les galets étaient entassés suivant une forme de cône tronqué présentant une dépression conique au sommet. La hauteur du cône était d'environ 6 m pour un diamètre au sommet de 8 m (Nikolayev *et al.*, 1996 ; Beysens and Mylymuk, 2005b). Il semble que le condenseur ait fonctionné jusqu'en 1915, date à laquelle la fondation se serait fendue. Les mesures n'ont pas été consignées, cependant 20 ans plus tard, Joukov (1931) mentionne un rendement de 360 L sur un événement. Toutefois, Nikolayev *et al.* (1996) ont montré que la structure massive du condenseur de Zibold ne devait permettre à la structure d'abaisser sa température en deçà du point de rosée qu'en de rares occasions.

Par la suite en 1929, un hydrométéorologue, Chaptal (1932), tenta d'ériger un condenseur massif à Montpellier. Il le détruisit après 2 années d'essais décevants, pour « ne pas induire en erreur les générations futures ». En 1930, l'ingénieur belge Knapen (1929) imagina une version modifiée de ces condenseurs. Il fit construire une tour évidée de 12 m de haut pour 12 m de large à la base à Trans-en-Provence (France). La tour existe toujours. Cependant, le rendement n'excéda jamais 12 L par nuit. Ces deux tentatives furent considérées comme non concluantes (Gioda and Acosta-Baladon, 1991).

Il fallut ensuite attendre 1962 pour que Gindel (1965) teste en Israël un condenseur léger composé d'un film de polyéthylène de 3 m² et placé en position inclinée d'environ 25°. Les rendements ont été relevés à 0,86 et 3,63 L / m²/ mois sur trois sites.

Depuis 1994 et après trois mois de test d'un condenseur radiatif par Nilsson (1994) en Tanzanie puis en Suède, le gisement quantitatif de rosée a été expérimenté dans de nombreux sites, un « réseau » de mesure se regroupant pour l'essentiel au sein de l'International Organization for Dew Utilisation « OPUR » ou Organisation Pour l'Utilisation de la Rosée. Trois sites ont été instrumentés en France (Grenoble, dès 1995, Ajaccio en 1999 et Bordeaux en 2000), ainsi que Wageningen (Pays-Bas) et Jérusalem (Israël). Les tests, standardisés sur un condenseur léger de 1 m², se sont alors étendus à la Croatie (Zadar, Komiza, Bisevo), l'Ethiopie (Bahir Dahr), l'Inde (Kothara, région du Kutch, état du Gujarat), l'Arabie Saoudite (Dharam), la Polynésie Française (Tikehau, Tahiti) et au Maroc (Mirleft). Dans la continuité des travaux précédents, ces trois années de recherches ont permis de poursuivre les mesures de rosée dans des sites variés et pour différents climats (Figure 1). Une orientation nouvelle a aussi été prise, car ces recherches ont été mises à profit pour développer l'ensemble des outils et connaissances pour la réalisation de condenseurs opérationnels de grande superficie (toitures, usines de rosée).



Figure 1 :  Stations de récupération de l'eau de rosée dans le monde : des condenseurs standards 1 m² installés dans différentes régions du globe, et des systèmes réels installés : usine de rosée de Panandhro (Inde), toiture de Bisevo (Croatie), expériences à Ajaccio (France).

Dans ce contexte, notre étude s'inscrit dans la problématique suivante :

Analyser les données collectées par la station pour comprendre le phénomène de la condensation atmosphérique dans une région semi-aride et de quantifier la rosée et étudier sa qualité.

La réponse à la question générale se traduit par trois questions auxquelles nous nous sommes efforcés de répondre au travers des différents chapitres présentés dans ce manuscrit :

1. Quelle quantité d'eau douce peut-on espérer produire sur la côte sud-ouest du Maroc ? Il faut pour cela analyser les données météorologiques (température et humidité de l'air, vent, nébulosité, pluviométrie), instrumenter les endroits les plus prometteurs et mettre en place une maquette de condenseur.

2. L'eau produite est-elle potable ? L'analyse des paramètres chimiques et biologiques de l'eau condensée devrait répondre à cette question.

3. Sur les sites sélectionnés, des toits pourront être équipés, en collaboration avec la population locale, et le rendement en eau estimé. La problématique des « toits-terrasses » sera analysée. L'intégration de condenseurs radiatifs sur ces toitures spécifiques à l'Afrique du Nord fera l'objet de travaux approfondis. De nouvelles architectures de condenseurs devront s'adapter aux particularités des bâtiments de la région étudiée.

4. Suivant les résultats, il pourra être envisagé, basée sur ces principes et en collaboration avec les communautés locales, la construction de petits condenseurs pour utilisation agricole (plantation d'arbres...).

Dans *le premier chapitre*, une brève présentation des ressources en eau et du contexte climatique au Maroc sera exposée.

Le second chapitre de ce manuscrit est de formaliser l'ensemble de ces questions. Nous présenterons ainsi toutes les bases physiques nécessaires à la compréhension du phénomène étudié. Les échanges d'énergie entre la surface du condenseur et l'atmosphère seront présentés de manière à mettre en évidence l'influence respective des caractéristiques de la surface et ainsi de se familiariser avec les principales grandeurs utilisées.

Le troisième chapitre présentera les techniques d'acquisition des données par la station ainsi que les méthodes d'analyses des différentes grandeurs météorologiques.

Les aspects évoqués précédemment donnent un aperçu général et schématique du problème et l'objectif du *quatrième chapitre* est de définir la rosée dans la région d'étude, analyser les paramètres climatiques et de développer un modèle pour estimer le taux de rosée à partir de données météorologiques dans différentes régions du Maroc dépourvues de stations de mesure de la rosée.

Dans *le cinquième chapitre*, une analyse des paramètres chimiques et biologiques de l'eau condensée sera présentée afin d'évaluer la potabilité de cette eau.

Enfin, dans *le sixième chapitre*, nous présentons les étapes d'installation des systèmes de collecte des eaux de rosée, de brouillard et pluie à Idouassksou.

I.1 Introduction

Le territoire marocain s'étend sur une superficie de 710.850 km² à la pointe nord-ouest du continent africain, entre le 21^{ème} et le 37^{ème} degrés de latitude nord et les 1^{er} et 17^{ème} degrés de longitude ouest. Il est bordé à l'Ouest par l'océan Atlantique (2934 km de côtes), au Nord par la Méditerranée (512 km de côtes), à l'est par les frontières algériennes (1350 km), et au Sud par la Mauritanie (650 km). Il est confronté plus que d'autres régions du monde, à des défis liés à la raréfaction des ressources en eau et à la pression croissante des activités socio-économiques et de la demande en eau qui en découle sur ces ressources, qu'elle devra relever pour assurer son développement durable.

Au Maroc, la maîtrise et la mise en valeur des ressources en eau sont une pratique très ancienne et depuis toujours un facteur déterminant de la structuration de l'espace et du développement des terroirs, car le contexte et les conditions climatiques y sont variables et irréguliers. L'irrégularité spatiale et temporelle des conditions climatiques, l'impact des sécheresses et des inondations successives, la distorsion entre les courbes de progression démographique et celles des productions agricoles et la nécessité absolue d'amélioration du bien-être des populations, sont autant de facteurs qui font de la maîtrise de l'eau un impératif technique, et économique et une voie privilégiée pour le développement économique et social. En adoptant dès les années 1960 une stratégie de maîtrise de l'eau et de sa valorisation, le Maroc s'est inscrit dans une politique pertinente de valorisation de ses ressources naturelles par la gestion planifiée et intégrée de l'eau, le distinguant ainsi d'autres pays ayant optés pour d'autres voies de développement économique et social. En application des hautes directives de Sa Majesté le Roi, les efforts ont été déployés en matière d'étude et de réalisation d'infrastructures hydrauliques qui ont permis de réaliser une centaine de barrages. Ainsi, le Maroc a intimement lié son développement économique et social à l'eau.

Toutefois, au fil des ans, de nombreux facteurs, notamment l'accroissement des besoins en eau et la rareté des ressources, la succession de sécheresse de longues durées et la dégradation de la qualité des eaux, la complexité des processus de développement socio-économique, les conditions climatiques défavorables et l'exploitation intensive des eaux souterraines ont entraîné des baisses alarmantes de niveaux dans la plupart des zones classées semi-arides à arides du Maroc (Margat, 1983- CSE 2001). Ceci signifie que le Maroc devrait faire face à une situation permanente de stress hydraulique et les réserves en eau par habitant, qui avoisinent déjà le seuil du stress à 1 000 m³/hab/an, se situeraient en 2020 autour à 500 m³/hab/an (Bzioui, 2000). C'est dans cette optique que la loi 10-95 a créé le concept d'«

Agences de Bassin versants». Elles ont pour mission d'évaluer, de planifier, de gérer et de protéger les ressources en eau au niveau du bassin hydraulique (Figure I.1).

L'objectif de ce chapitre est de montrer d'une part, et de manière générale les ressources en eau et les conditions climatiques rencontrées dans les différents bassins hydrogéologiques, et d'autre part et de manière aussi exhaustive que possible dans le bassin hydrologique de Souss-Massa.

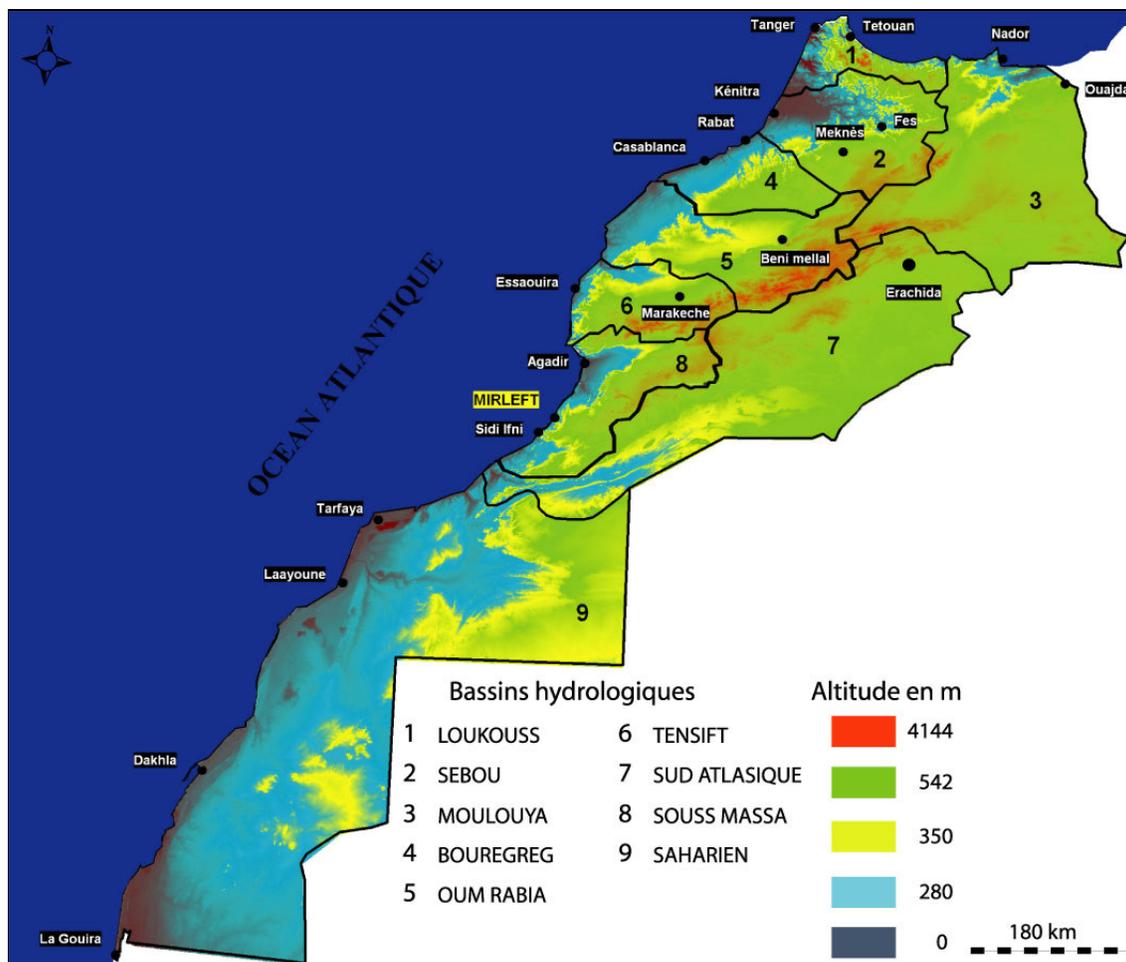


Figure I.1 : Carte de découpage de Bassins hydrauliques. La région de Mirleft se trouve dans le bassin de Souss-Massa (8).

I.2 Ressources en eau

Les apports pluviométriques sur l'ensemble du territoire sont évalués à 150 milliards de m³. Sur ces apports pluviométriques, la pluie utile ne représente que 20 %, soit 30 milliards de m³. Si l'on déduit les pertes par évaporation et les écoulements non maîtrisables vers la mer, le potentiel hydraulique mobilisable, dans les conditions techniques et économiques actuelles, est estimé à 20 milliards de m³ dont 16 milliards à partir des eaux superficielles et 4 milliards en provenance des eaux souterraines (MAT., 2001) (Tableau I.1). Cette estimation reste tributaire du niveau d'évaporation des eaux qui dépend directement de la température. Ainsi et devant le réchauffement significatif qu'a connu le royaume durant le XX^e siècle (plus de 1°C) et l'occurrence accentuée des sécheresses durant les trois dernières décennies, une validation des estimations des différentes composantes de ce cycle de l'eau s'impose. Les 20 milliards de m³ économiquement et techniquement mobilisables pourraient être facilement revus à la baisse. Les apports pluviométriques sont aussi caractérisés par une forte irrégularité de leur distribution dans l'espace, diminuant fortement du Nord au Sud et de l'Ouest à l'Est. Ces apports sont inégalement répartis sur les différentes régions du pays. Ainsi 15 % de la superficie totale reçoit plus de 50 % des apports pluviométriques. Les régions du Nord et le bassin de Sebou, bien que n'occupant que 8,5 % de superficie totale, reçoivent plus de 29,3 % des précipitations globales et participent pour 51,1 % des écoulements, alors que le bassin de la Moulouya, situé à l'Est, et occupant 8,1 % de cette superficie ne reçoit que 9,4 % de pluviométrie globale et ne participe que pour 8,7 % des écoulements moyens.

Tableau I.1 : Ressources en eau du Maroc et possibilités de mobilisation (en milliards de m³).

Maroc	Ressources en eau	Ressources mobilisables
Eau de surface	22.5	16
Eaux souterraines	6.5	4
Total	29	20

I.2.1 Ressources en eau de surface

Réparties sur une dizaine de bassins versants, les ressources en eau de surface du royaume se caractérisent par l'irrégularité de leur répartition. Les seuls bassins de Sebou, d'Oum Rabia et de la Moulouya rassemblent les 2/3 des ressources en eau de surface (Figure I.2). Par ailleurs, les besoins en eau ne sont pas dans les zones les plus riches en eau d'où la nécessité de transferts d'eaux coûteux et difficiles à réaliser : la région Nord-Nord Ouest avec 35 % de la population du pays détient 48 % des ressources en eau alors que la région Centre

Ouest avec 46 % de la population ne contient que 34 % des ressources en eau (MAEE. 1998). Le potentiel des eaux de surface est très vulnérable aux aléas climatiques. En effet, en années de sécheresses sévères, celui-ci peut baisser de 30 à 90 %. L'importance en fréquence et en intensité des sécheresses hydrologiques dans les différents bassins versants n'est pas uniforme ; les régions de l'Oriental, du Tensift, du Souss-Massa et les zones sud atlasiques sont généralement les plus touchées par les sécheresses. Celles du nord le sont moins mais les répercussions sont toutefois importantes car les réserves d'eaux souterraines des régions Nord sont très limitées.

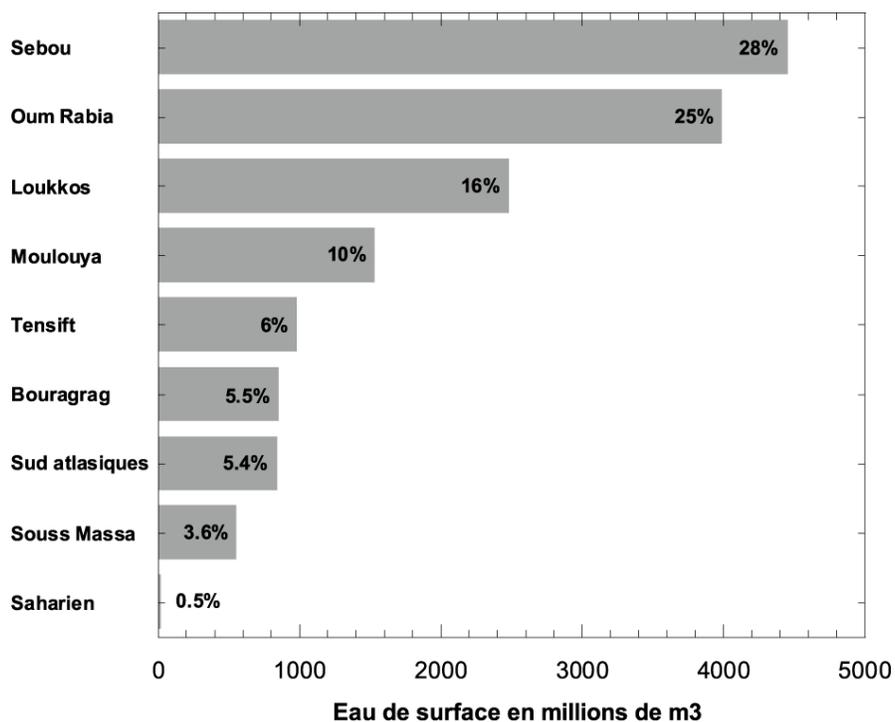


Figure I.2 : Répartition des ressources en eau de surface au Maroc.

I.2.2 Ressources en eaux souterraines

Les eaux souterraines constituent une part importante du patrimoine hydraulique du Maroc. Elles présentent des avantages certains sur le plan de la couverture des besoins, par rapport aux eaux de surface, en raison de leur régularité et de leurs faibles coûts de mobilisation comparativement aux eaux de surface. Quoique très rare dans les régions sahariennes, elles y représentent la principale ressource en eau.

Le Maroc peut être découpé en six grands domaines hydrogéologiques distincts (Es Sami, 1994, El Hebil, 1987, CSE., 1992, Agoussine, 1993, Bouchaou, 1995) :

- Le domaine *rifain*, constitué par les chaînes calcaires qui couvrent de vastes étendues dans la région de Tetouan, Chefchaoun, jusqu'à l'Ouest d'Al Houceima. Tout au long du littoral, il existe une multitude de nappes alluviales plus ou moins importantes, piégées dans ces reliefs.
- Le domaine *atlantique* est le plus riche en eau souterraine. Des nappes importantes se situent dans les formations géologiques assez récentes. Elles sont libres ou localement captives. Les formations de piémonts atlasiques, dont les principales sont le Tadla, le Haouz, le bassin de Meknès-Fès, le Doukkala et le Gharb, donnent naissance à des réservoirs aquifères de première importance.
- Le domaine *atlasique* est constitué essentiellement de formations calcaires jurassiques fracturées et karstifiées (Moyen-Atlas, Haut-Atlas calcaire). Le reste du domaine est composé de formations cristallines peu perméables (Haut-Atlas occidental et oriental, massif ancien du Haut-Atlas). Les aquifères atlasiques jouent un rôle de réservoir régulateur ; les sources sont nombreuses et soutiennent l'été de la plupart des cours d'eau. Ce domaine est caractérisé par une puissante série calcaire au centre et au nord-est du domaine, et par un enneigement abondant et prolongé sur une grande partie de la chaîne montagneuse.
- Le domaine *oriental* qui, à l'exception de la frange côtière bénéficiant de l'influence méditerranéenne, constitue une unité géographique dominée par l'aridité. Les principaux réservoirs aquifères sont essentiellement détritiques : les nappes d'Ain Beni Mathar, les Angads.
- Le domaine *sud-atlasique*, caractérisé par une aridité climatique associée en grande partie à une géologie dans l'ensemble peu favorable. Les principales nappes sont celles du Souss, des Chtouka, du Draa, de Tafilalet, du Guir et de Guelmim.
- Le domaine *saharien*, correspondant aux bassins de Séguia El Hamra et Oued Eddahab où le socle cristallin et sa couverture primaire occupent les zones Est et Sud du pays et renferment de nombreuses nappes d'extensions limitées.

Sur l'ensemble du territoire national, on dénombre 32 nappes profondes (profondeurs variant de 200 à plus de 1 000 m) et plus de 48 nappes superficielles (une faible profondeur de niveau d'eau). Les premières sont difficiles d'accès avec un coût de mobilisation et d'exploitation assez élevé, les secondes plus accessibles mais aussi plus vulnérables à la pollution et à la sécheresse. Globalement, les ressources en eau souterraines s'élèvent à près de 9 milliards de m³/an comme ressources renouvelables dont 3 milliards de m³/an s'écoulent

par l'intermédiaire des sources contribuant à la régularisation des débits des oueds et 2 milliards de m³/an s'écoulent directement vers les mers. Ainsi, les ressources en eau souterraines mobilisables sont estimées à 4 milliards de m³/an (Figure I.3). Ces chiffres n'englobent pas les réserves qui constituent des ressources non renouvelables et qui peuvent être exploitées en période de pénurie d'eau. D'ailleurs pour certaines nappes, une surexploitation s'est déjà matérialisée par des baisses des niveaux piézométriques : c'est le cas du Souss, du Haouz, de Jbel Hamra, de Saïss.

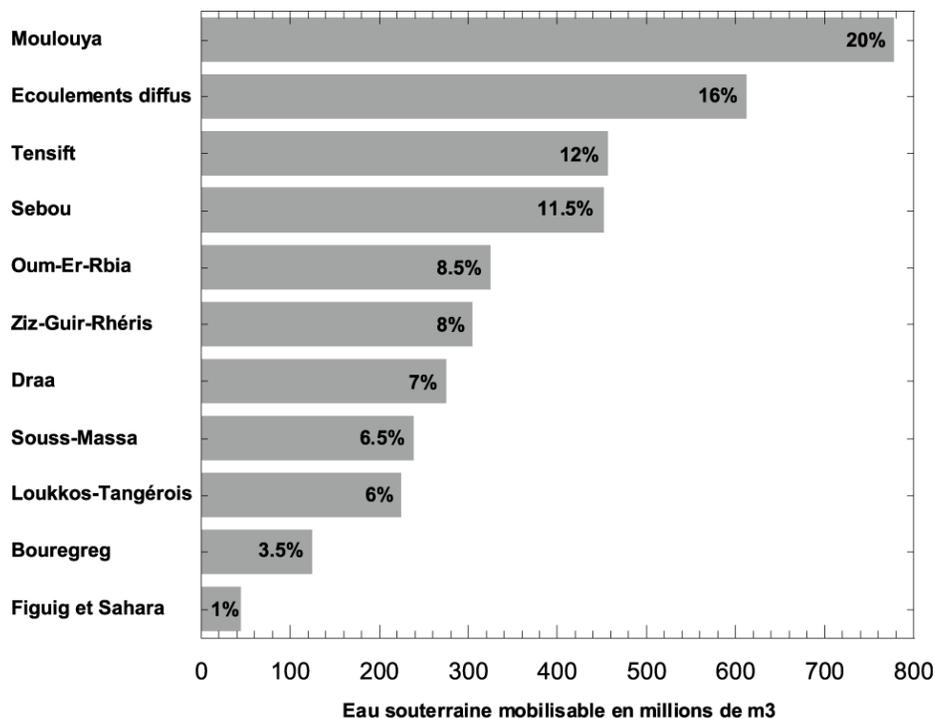


Figure I.3 : Répartition des ressources en eau souterraine au Maroc.

I.2.3 Ressources en eaux non conventionnelles

Devant les difficultés et les prix croissants de mobilisation des eaux conventionnelles, le recours aux eaux non conventionnelles a connu un léger développement depuis le début des années 90. Il s'agit principalement de la réutilisation des eaux usées et de la déminéralisation des eaux saumâtres et dessalement des eaux marines. Cela a été fait de façon structurée et maîtrisée pour les eaux saumâtres et salines. Ce n'était pas le cas pour les eaux usées réutilisées de façon anarchique et non contrôlée par les agriculteurs avec des effets néfastes sur la santé et l'hygiène.

I.2.3.1 Eaux usées

Le potentiel d'eaux usées est évalué pour l'an 2000 à plus de 500 millions de m³. 50 % de ces eaux sont rejetées dans les bassins versants intérieurs et 50 % sont supposées être rejetées en mer. En réalité une bonne partie de ces eaux est réutilisée à l'état brut en agriculture (Bzioui, 2000).

La réutilisation des eaux usées brutes sans le moindre traitement est une pratique qui s'est répandue fortement au Maroc durant les années 80 (période de grandes sécheresses). On estime que les eaux usées brutes ont irrigué en 1994 plus de 7200 hectares de cultures maraîchères, céréalières et fruitières situées près des principaux centres urbains avec des conséquences néfastes pour la santé des populations; soit environ 70 millions de m³ d'eaux usées brutes utilisées.

Une valorisation saine et rentable du potentiel hydrique que représentent ces eaux usées, reste tributaire aujourd'hui de la mise en place de systèmes fiables de traitement et d'épuration des eaux usées brutes (SECE., 2004). Le seul volume d'eaux usées perdues en mer évalué autour de 200 millions de m³ permettrait une fois traitée d'irriguer plus de 25.000 ha (CSEC., 2001).

I.2.3.2 Dessalement d'eau de mer

Au Maroc le recours au dessalement des eaux est une pratique récente. Les premiers grands projets ont été réalisés dans les années 75 pour le sud du Maroc. L'unité la plus importante à ce jour est la station de Lâayoune mise en service en 1995. Elle permet aujourd'hui aux habitants de cette ville de disposer de 7000 m³/jour d'eau potable. Le prix de revient est encore de plus de dix fois supérieur au prix du m³ d'eau conventionnelle, autour de 20 DH (2€) le m³. Le développement du dessalement reste une solution alternative pour les périodes de pénurie à venir où le coût des eaux conventionnelles deviendrait plus élevé. Plusieurs projets sont à l'étude pour les horizons 2010-2020 en vue d'approvisionner les régions sud du pays (ONEP., 2004).

I.3 Raréfaction et surexploitation des ressources en eau

La rareté des ressources en eau et leur limitation, conjuguées au développement de moyens modernes d'exploitation des eaux souterraines sont à l'origine de la forte pression subie par la ressource depuis la fin des années 70, ce qui a entraîné la surexploitation des eaux souterraine et la rupture de l'équilibre qui prévalait entre les prélèvements traditionnels et les possibilités de recharge naturelle. Les informations disponibles, qui restent peu fiables,

montrent que les volumes exploités sont supérieurs aux volumes exploitables d'une manière durable de près de 718 Mm³ par an. Ceci a eu pour conséquence la baisse des niveaux piézométriques, la diminution des débits voire le dessèchement des sources, la perturbation de l'approvisionnement en eau des secteurs d'irrigation traditionnelle (Figure I.4).

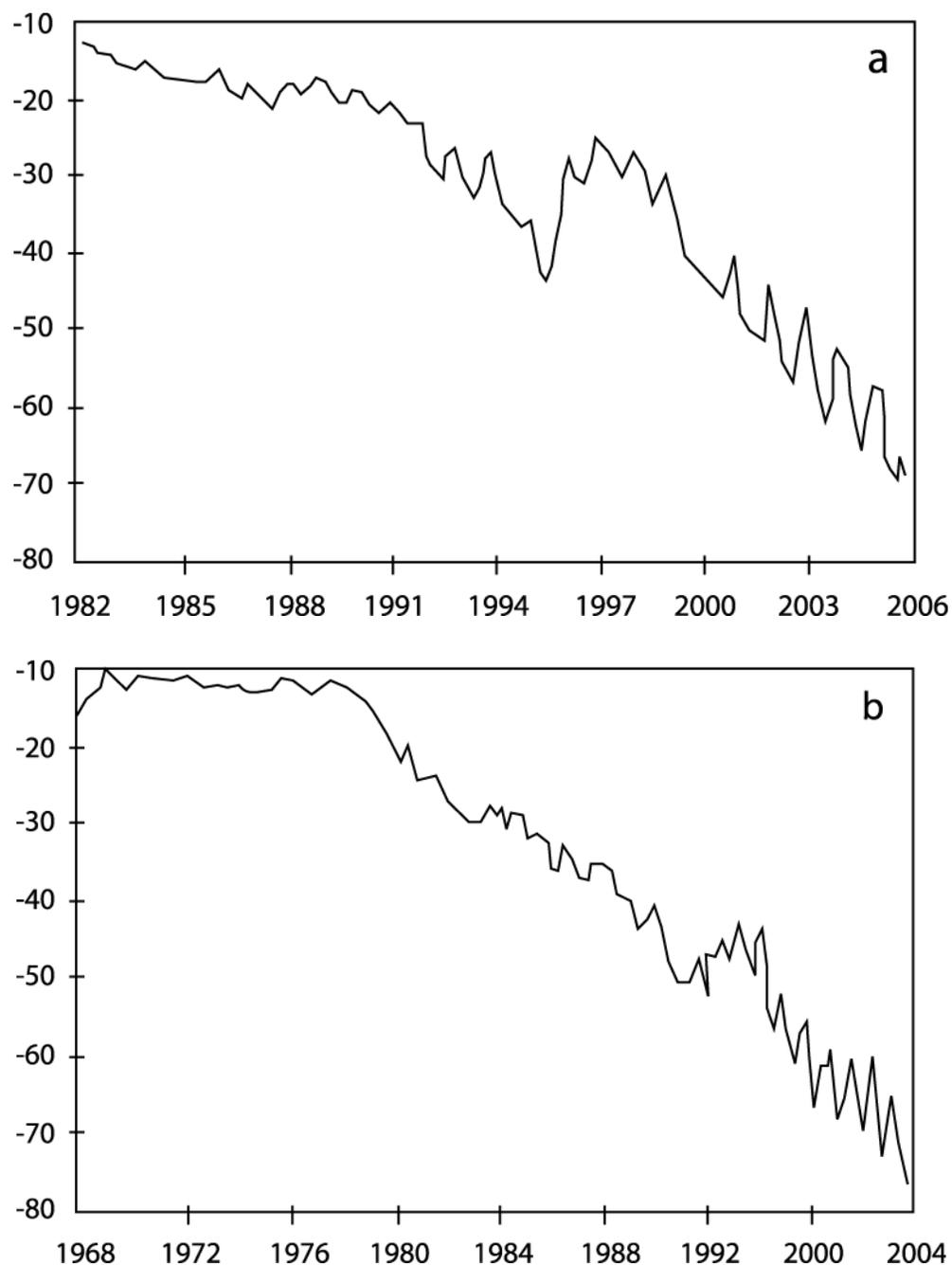


Figure I.4 : Baisse du niveau de la nappe de Souss (a) et de Saïss (b) en m.

Au Maroc, le volume d'eau disponible par habitant et par an, indicateur de la richesse ou de la rareté de l'eau d'un pays, avoisine le seuil de 1000 m³/hab/an, communément admis comme seuil critique avant le saut vers la pénurie. Ce taux varie actuellement de 180 m³/hab/an pour les zones réputées très pauvres en ressources en eau (Souss-Massa, Sud Atlasique, Sahara) à près de 1850 m³/hab/an pour les zones du bassin hydrologique du Loukkos, du Tangérois et Côtiers Méditerranéens relativement riches.

Les ressources en eau par habitant se situeraient autour de 720 m³/hab/an vers l'horizon 2020. A cette date, près de 14 millions d'habitants, soit près de 35% de la population totale du royaume disposeraient de moins de 500 m³/hab/an.

La pénurie chronique d'eau devient donc une donnée structurelle qu'on ne peut plus ignorer pour tracer des techniques d'exploitation d'autres ressources d'eau non conventionnelles au Maroc.

I.4 Climat au Maroc et son impact sur les ressources en eau

Bien que doté d'une situation géographique favorable, à l'extrême nord-ouest de l'Afrique, le Maroc reste un pays à climat essentiellement semi-aride à aride dans la majeure partie de son territoire. Le régime des précipitations est caractérisé par une grande variabilité temporelle et spatiale. Ce régime varie d'une région à l'autre tout en restant dominé par une forte irrégularité dans le temps. L'alternance d'épisodes de sécheresse et de forte hydraulité est un caractère de plus en plus marquant des régimes climatiques et hydrologiques du pays. Ce climat se caractérise par des contrastes importants avec des types de climats très différents et ce, en relation avec les particularités géographiques et écologiques de la région (MCE., 1998, MATUAE., 2001a, 2001b) :

Le Maroc s'étend sur une superficie de 710.850 km² dont une grande partie est située en zone désertique :

- La région est à dominance semi-aride à aride, soumise à un climat résultant d'influences maritimes au nord (Mer Méditerranée) et à l'ouest (Océan atlantique) et sahariennes au sud.
- Une grande diversité de type de climat, associée à l'étendue du pays en latitude, à l'existence de chaînes montagneuses dépassant les 4000 m et à l'influence maritime au voisinage des côtes.

- Une grande variabilité spatiale, et inter-annuelle des précipitations avec des précipitations plus faibles dans la partie Sud, un nombre de jours de pluie très limité (moins de 50 jours sur une grande partie du pays) et des épisodes de sécheresses périodiques et fréquents dont la durée peut dépasser trois années successives.
- Des températures moyennes annuelles élevées, dépassant les 20°C dans le sud et plus douces le long du littoral. Ceci est lié au niveau élevé du rayonnement solaire parvenant aux différentes régions du pays, et aux advections fréquentes de masses d'air chaudes. Ces éléments entraînent une forte évapotranspiration.

I.4.1 Le relief

Sur le plan du relief, le territoire marocain est marqué par l'existence de puissantes chaînes de montagnes occupant le Nord et le centre du territoire marocain. Se développant entre le sud-ouest et le nord-est, le Haut Atlas compte plusieurs sommets de plus de 3500 m dont certains dépassent 4000 m (Jbel Toubkal : 4165 m d'altitude). Le Moyen Atlas, plus au Nord, compte également des sommets élevés de 2700 m à 3300 m. A l'extrême Nord du Maroc la chaîne du Rif, avec son versant Nord plongeant dans la mer Méditerranée, culmine à 2456 m.

L'Anti-Atlas, au Sud du Haut-Atlas, atteint des altitudes dépassant 2500 m. Les plateaux occupent également une grande partie du territoire et se situent à des altitudes variables : 200-400 m près du littoral atlantique (zone de Larache, Zemmours, Zaërs), 500-900 m à l'Ouest des chaînes du Moyen et du Haut Atlas (Saïa et plateau des phosphates) et des altitudes pouvant atteindre 1500 m (Zaïan, Causses du Moyen Atlas, Hauts Plateaux de l'Oriental). Les plaines s'étendent sur de vastes portions du territoire : elles se situent le long du littoral atlantique (Gharb, Chaouia, Doukkala, Souss), à l'intérieur comme les plaines du Tadla et du Haouz, dans l'Oriental comme la plaine de la basse Moulouya, et le long du littoral méditerranéen (Martil, Laou, Triffa).

I.4.2 Précipitations

Elles sont caractérisées par une très forte variabilité spatio-temporelle. Du fait de l'influence océanique et de l'effet de barrière de l'Atlas, les précipitations moyennes varient fortement du Nord vers le Sud du pays (700 mm au nord à moins de 25 mm au sud) et de l'ouest vers l'Est (de 600 mm à 100 mm), avec une amplification sur les reliefs du Rif et de l'Atlas (jusqu'à plus de 2000 mm). La variabilité temporelle des précipitations est très

marquée d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre ; elle a un impact considérable sur les ressources en eau et sur la production agricole du pays (Figure I.5).

Le pluviomètre se répartit comme suit :

- Supérieure à 800 mm dans la zone arrosée du nord-ouest.
- De 600 à 800 mm dans la zone nord et la zone atlasique.
- De 400 à 600 mm dans la zone Sebou, Bouregreg et Oum Rbia.
- De 200 à 400 mm dans le Tensift, Souss Massa et l'Oriental.
- Inférieure à 200 mm dans les zones sud atlasiques et le Sahara.

Les précipitations ont enregistré une tendance générale à la baisse dans toutes les régions du Maroc (Figure I.6). En plus du fait qu'elles étaient de plus en plus rares, elles se sont caractérisées par des disparités spatiales importantes et par de fortes fluctuations, entre années de sécheresse, parfois sévères, et années à forte pluviométrie. Durant la période récente 1955-2004, le Maroc a connu 7 périodes de grande sécheresse, dont 5 après 1975. Le nombre de jours de pluie se limite à 50 jours (100 mm) sur une grande partie du pays. Ces deux tendances, rareté et irrégularité, renseignent sur le caractère crucial de la question de l'eau au Maroc et expliquent la très grande vulnérabilité des ressources en eau à la donne climatique.

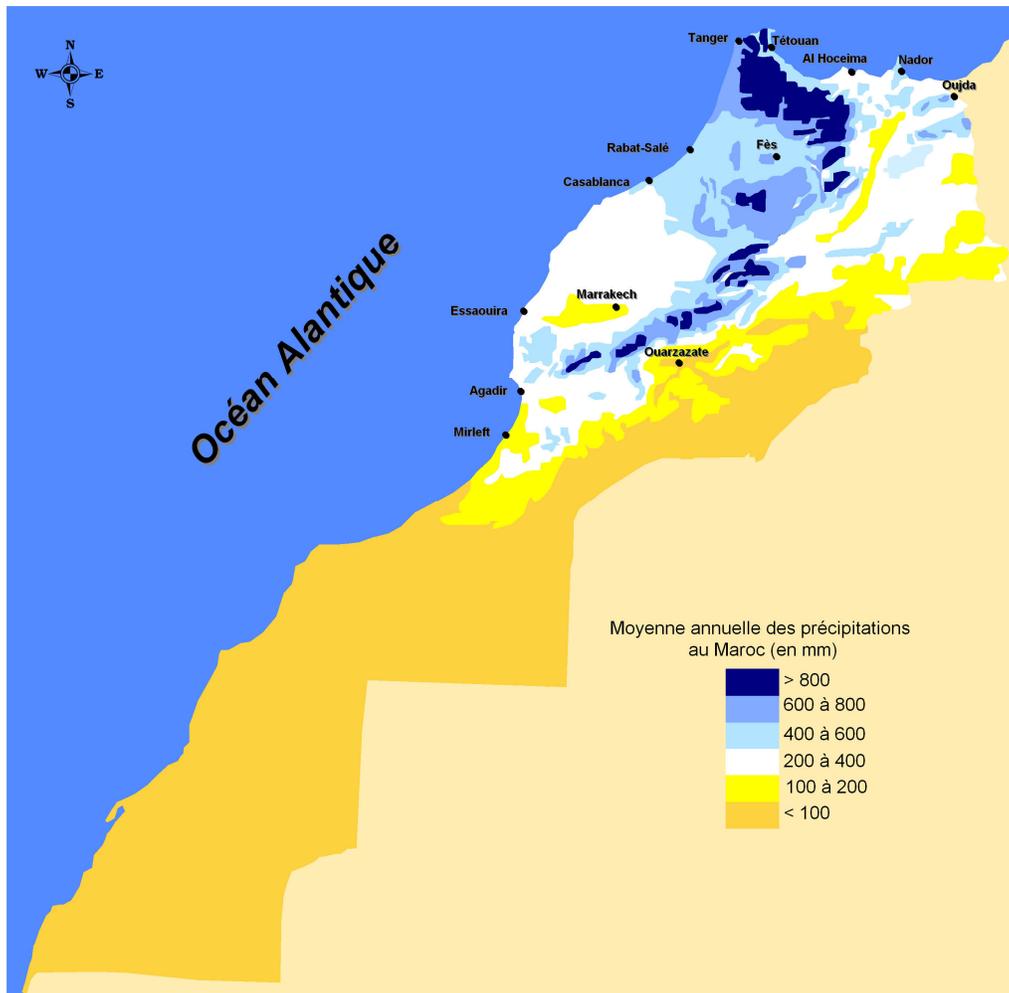


Figure I.5 : Répartition spatiale des précipitations annuelles dans le Maroc.

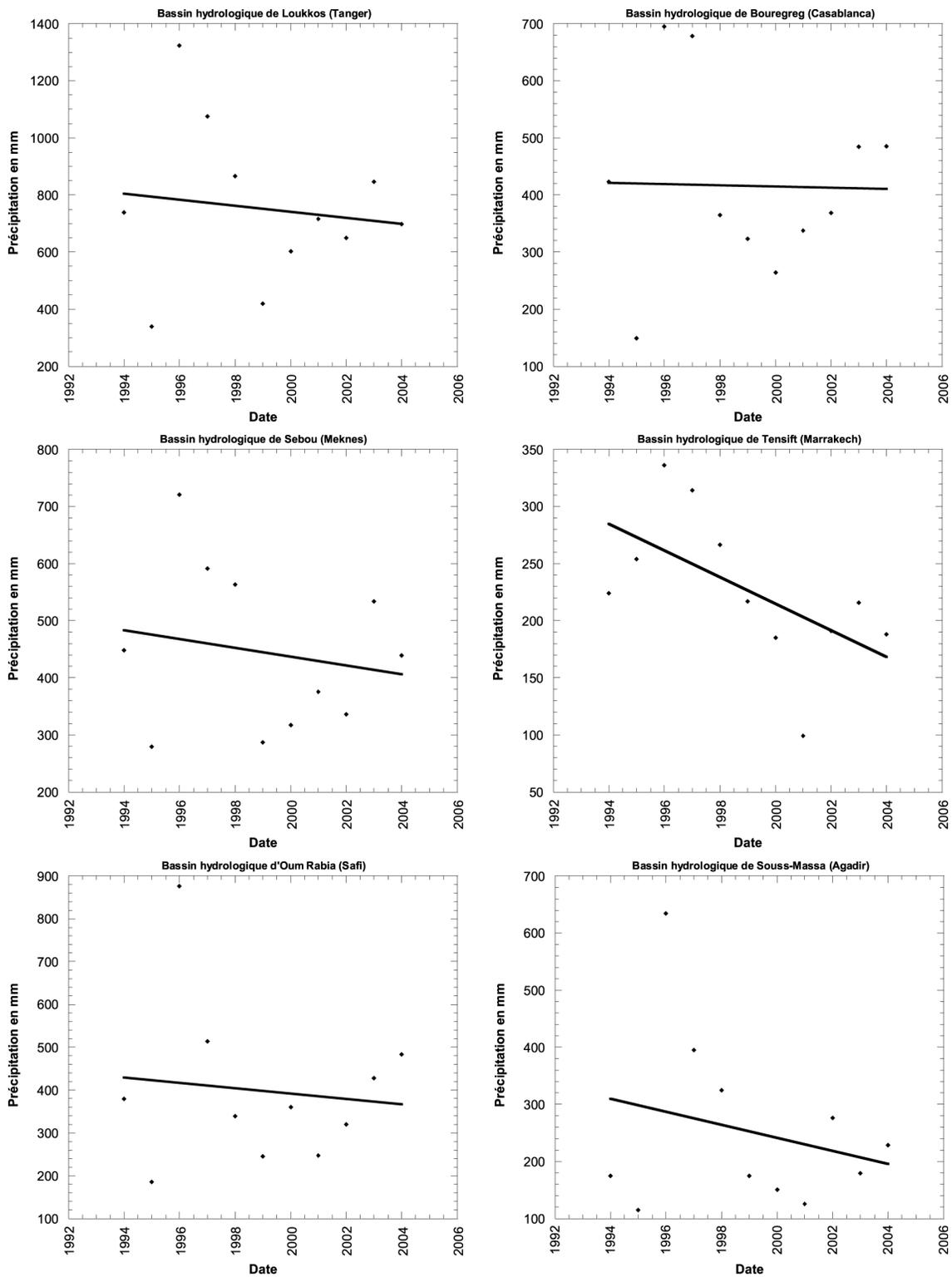


Figure I.6 : Évolution de la pluviométrie dans certaines régions marocaines. Les précipitations ont enregistré une tendance générale à la baisse dans toutes les régions du Maroc. En plus du fait qu'elles étaient de plus en plus rares, elles se sont caractérisées par des fortes disparités spatiales et temporelles.

I.5 Cas du bassin hydrologique de Souss Massa

I.5.1 Situation géographique

La région de Souss-Massa- Tiznit constitue un bassin triangulaire individualisé entre le massif du Haut-Atlas occidental, au Nord, l'Anti-Atlas au Sud et à l'Est et l'océan Atlantique à l'Ouest. Elle s'étale à peu près sur une surface de 16000 km². Ce bassin comprend la grande vallée de l'oued Souss, la plaine des Chtouka, la vallée de l'oued Massa et la plaine de Tiznit. Les courbes de niveau, s'écartant en arrêtes de poisson du cours des principaux oueds Souss et Massa, traduisent une surface topographique en pente douce et régulière ne dépassant guère 500 m d'altitude. Le passage de la plaine aux montagnes qui l'entourent est partout brutal. Au Sud de la ville d'Agadir les terrasses marines de la côte rocheuse par laquelle le HautAtlas aborde l'océan, disparaissent. Les plaines de Souss, Chtouka et Massa sont recouvertes de formations dunaires prenant généralement l'aspect de dunes basses peu mobiles.

I.5.2 Climatologie du bassin

Le régime climatique du bassin hydrologique de Souss Massa est caractérisé par une aridité (Sauvage 1963), dont l'intensité est conditionnée par la proximité de l'océan Atlantique sur lequel le bassin s'ouvre largement, par l'altitude du Haut-Atlas occidental au Nord, l'Anti-Atlas au Sud et à l'Est et en une moindre mesure par la latitude saharienne.

Par ailleurs, le contraste saisonnier est très bien marqué, les pluies qui sont souvent concentrées durant la période automnale et hivernale, sont irrégulières. Le reste de l'année, la sécheresse prend une ampleur considérable surtout dans les zones de plaine où les températures et l'évaporation sont élevées (Khiri, 2003).

La climatologie se caractérise donc par :

- un climat semi-aride. Les amplitudes thermiques sont assez importantes entre l'hiver et l'été : 33,33°C comme température maximale et 9,66°C comme température minimale.
- une faible pluviométrie moyenne allant de 159,5 (Tiznit) à 236 mm/an (Ait Baha) avec des variations interannuelles et intersaisonniers importantes.

I.5.2.1 Les précipitations du bassin

Dans le bassin hydrologique de Souss-Massa, les pluies parviennent suite à l'effacement de l'anticyclone des Açores laissant le passage aux perturbations (Weisrock, 1993 cités par Khiri, 2003). Les flux perturbés intéressant la région ont alors deux origines principales : les

unes relèvent des perturbations de front polaire, et sont donc essentiellement de secteurs Nord et de secteur Ouest, mais peuvent aussi prendre parfois une orientation de secteur Sud-Ouest. Les autres, de Sud, moins fréquentes dans la région, se produisant lorsqu'une aire de basse pression atlantique très méridionale s'établit ou lorsqu'il existe une dépression sur le golfe de Cadix et les Canaries (Delannoy, 1971 et 1993). Il y a alors condensation de l'air tropical maritime plus au moins humide. Confrontée à cette double origine des précipitations, les deux chaînes de montagnes exercent un rôle décisif sur leur quantité, leur nature et leur distribution.

Dans le tableau ci-dessous (Tableau I.2), on remarque que durant les 6 dernières années, l'évolution des précipitations dans les différentes régions du bassin hydrologique de Souss-Massa ont tendance à diminuer (Figure I.7).

Durant cette année d'étude de mai 2007 à fin avril 2008, la région de Mirleft a été caractérisée par des précipitations assez faibles atteignant une quantité de 48,65 mm avec 31 jours de pluie, à Tiznit, les pluies n'ont pas dépassé 35 jours (Khiri, 2003). Les précipitations mensuelles sont maximales en décembre- février-mars et minimales en mai- juin- juillet, avec une averse pendant le mois d'Août où on a enregistré des précipitations élevées par rapport aux autres mois (Figure I.8).

I.5.2.2 Les températures du bassin

On observe que la température dans le bassin hydrologique de Souss-Massa durant les années 2006, 2007 et 2008 présente respectivement un maximum en Septembre, Juillet et Août et un minimum en janvier pour les deux premières années et en décembre pour 2008. Les moyennes mensuelles sont pour ces trois années sont respectivement ; 19.26°C ($\pm 4,08$), 18.98°C ($\pm 3,45$) et 19.38°C ($\pm 3,38$) (Tableau I.2, Figure I.9). Les amplitudes thermiques sont relativement élevées (10°C en moyenne), ceci est dû principalement aux contrastes climatiques qui règnent dans la région. En effet, dans cette région, les hautes pressions subtropicales se déplacent vers le Nord et la dépression saharienne s'étend sur le Maroc. Les températures maximales sont atteintes par temps de Chergui (vent du Sud-est).

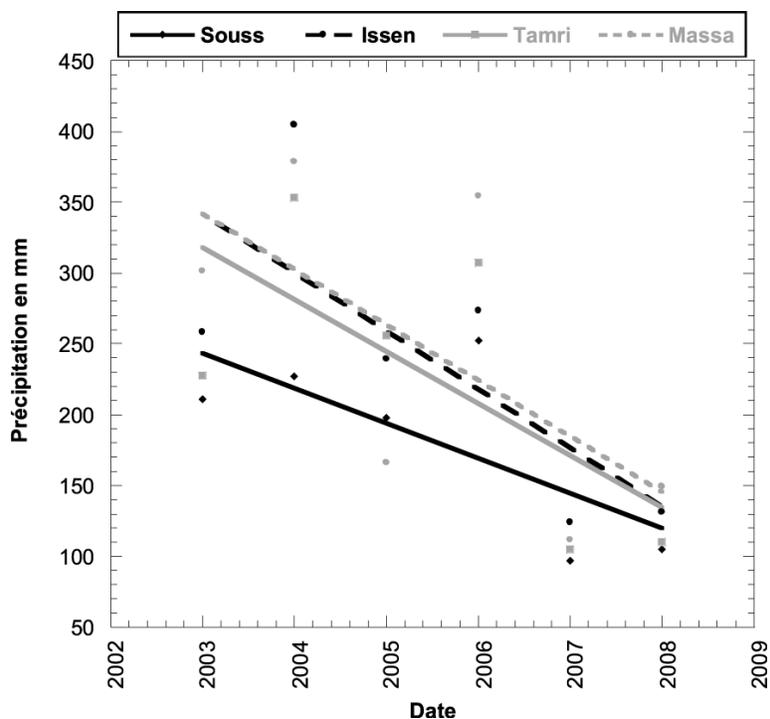


Figure I.7 : Évolution de la pluviométrie dans les régions du bassin hydrologique de Souss-Massa durant les 6 dernières années (BHSM). Les précipitations ont enregistré une tendance générale à la baisse.

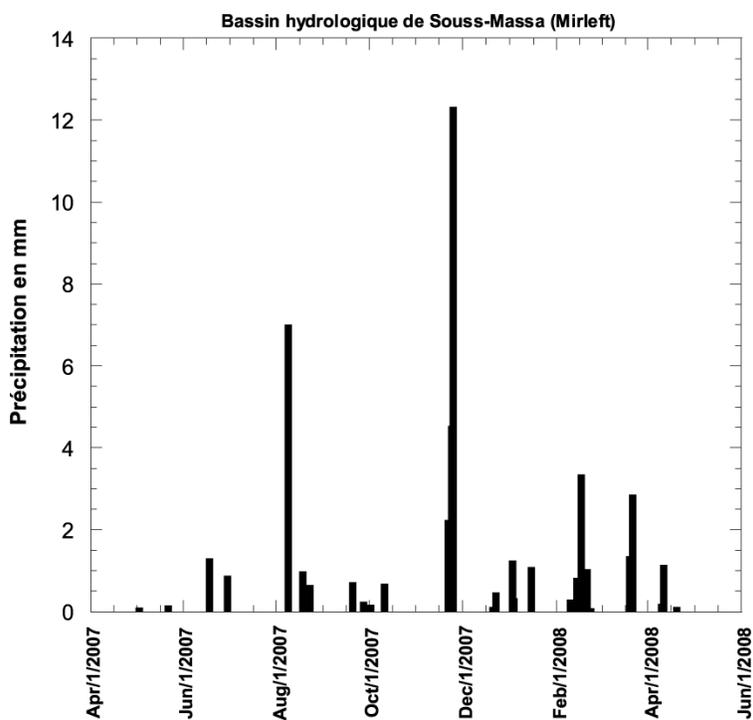


Figure I.8 : Les précipitations dans la région de Mirleft durant la période d'étude (Mai 2007 à Avril 2008).

Tableau I.2 : Description de la température mensuelle dans la ville d'Agadir.

Date	T°C (2006)	T°C (2007)	T°C (2008)
Janvier	12,42 ± 1,12	14,19 ± 2,73	15,10 ± 2,13
Février	14,18 ± 1,91	15,68 ± 2,28	18,11 ± 3,20
Mars	16,55 ± 2,51	17,26 ± 2,61	17,58 ± 2,79
Avril	18,77 ± 3,00	16,72 ± 2,12	21,80 ± 4,32
Mai	20,32 ± 1,35	19,29 ± 2,69	20,10 ± 2,09
Juin	21,59 ± 0,68	21,13 ± 1,00	21,87 ± 2,16
Juillet	23,68 ± 2,24	24,94 ± 4,22	23,19 ± 1,28
Août	23,42 ± 1,31	23,13 ± 2,01	23,29 ± 1,49
Septembre	23,97 ± 3,45	21,63 ± 1,10	23,00 ± 1,80
Octobre	22,03 ± 2,59	21,32 ± 2,60	19,32 ± 2,25
Novembre	20,38 ± 3,17	17,73 ± 3,00	15,73 ± 3,10
Décembre	13,87 ± 2,06	14,77 ± 1,76	13,55 ± 1,82
Moyenne	19,26	18,98	19,38
Maximum	23,27	24,94	23,29
Minimum	12,42	14,19	13,55
Ecart-type	4,08	3,45	3,38
Effectif	362	364	365

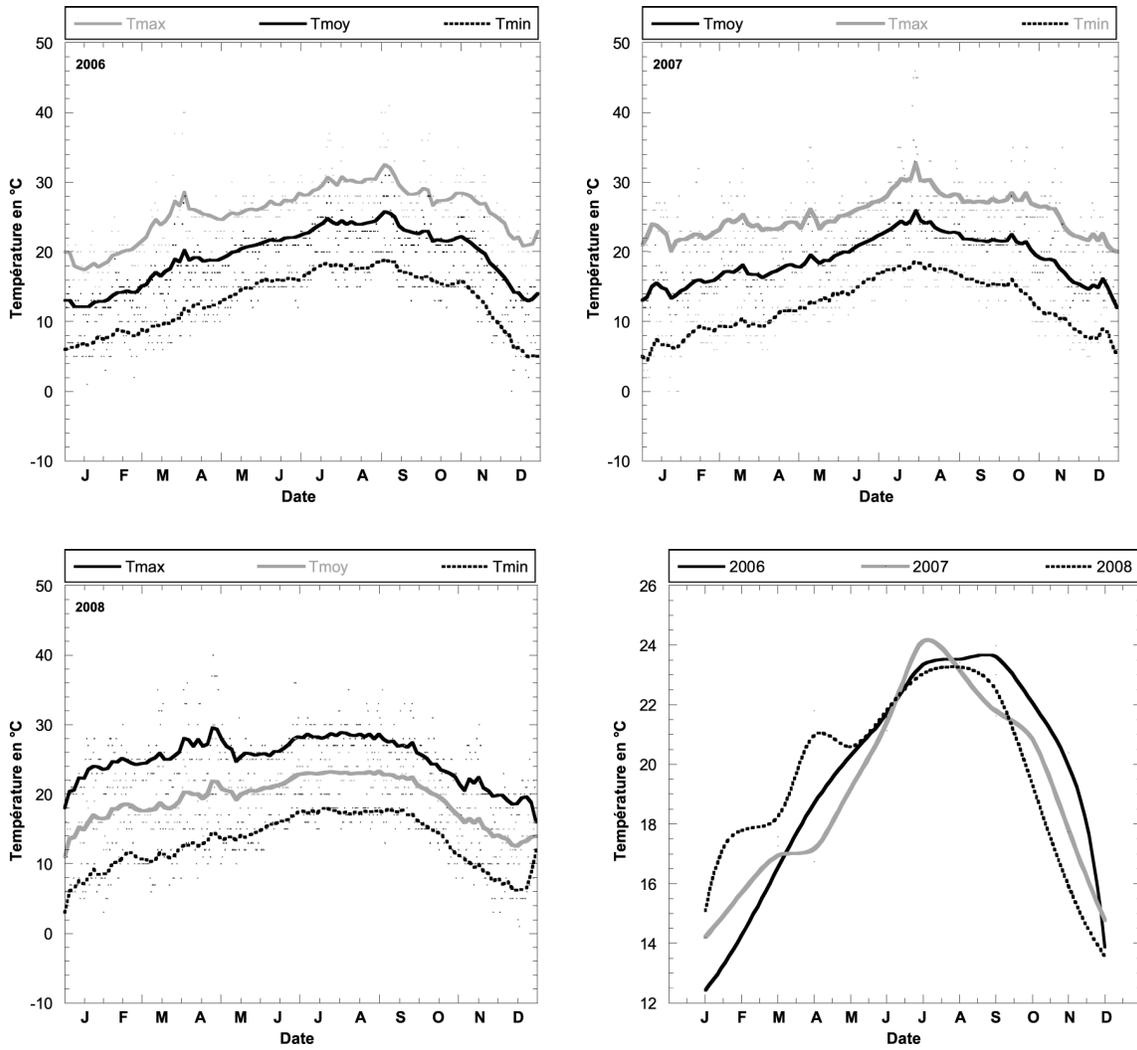


Figure I.9 : Évolution de la température moyennes journaliers et mensuelle durant les trois dernières années (2006-2007-2008) dans la ville d'Agadir.

I.5.2.3 Aridité du bassin

L'aridité peut s'exprimer quantitativement par différents indices d'aridité conventionnels et empiriques, la plupart simples rapports hydro-thermiques fondés principalement sur des grandeurs moyennes de précipitations et de température, qui sont utilisés pour définir les degrés d'aridité et les conditions de l'écoulement fluvial. Ils ont été proposés par des climatologues, des morphologues, des géographes, des botanistes. Les plus connus sont ceux de De Martonne (1926), Emberger (1932), Thornthwaite (1948), Bagnouls et Gaussen H. (1953).

Au début du siècle dernier E. de Martonne a mis au point un indice d'aridité :

$$I_{DM} = \frac{P}{T + 10} \quad (I.1)$$

Où P représente les précipitations annuelles moyennes (en mm) et T la température moyenne annuelle (en °C). Plus la valeur de I est faible, plus la zone considérée est aride.

Suivant l'ampleur du déficit hydrique déterminant, plusieurs degrés d'aridité peuvent être différenciés, se définir par des classes d'indices d'aridité convenues et recevoir des qualifications particulières applicables à des zonalités climatiques. En fonction de cet indice, l'on peut ainsi classer les climats dans différentes catégories (Tableau I.3).

Tableau I.3 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de De Martonne.

Valeur de l'indice	$0 < I_{DM} < 5$	$5 < I_{DM} < 10$	$10 < I_{DM} < 20$	$20 < I_{DM} < 30$	$30 < I_{DM} < 55$
Type de climat	hyper-aride	aride	semi-aride	semi-humide	humide

Afin de mieux évaluer quantitativement le degré d'aridité qui règne dans la région d'étude, nous avons calculé cet indice dans notre zone d'étude et on l'a comparé à d'autres régions dans le bassin hydrologique de Souss-Massa dans le Haut-Atlas, dans l'Anti-Atlas ainsi que pour la plaine et le bassin versant (EL Morjani, 2002).

Si on se base sur l'indice de De Martonne, le bassin hydrologique du Souss-Massa est soumis à un climat aride avec tendance à semi-aridité et hyperaride. La plaine et l'Anti-Atlas se trouvent dans un climat aride avec tendance à l'hyper-aridité et le Haut-Atlas est caractérisé par un climat semi-aride, ce qui en fait la région la plus arrosée du bassin. Par contre vers le sud, dans la région de Mirleft, les précipitations sont très faibles influencées par l'hyperaridité du climat (Tableau I.4).

Tableau I.4 : Indice de De Martonne pour les régions du bassin hydrologique de Sous-Massa.

Régions	Précipitation (mm)	Température (°C)	I_{DM}	Climat
Plaine	188,6	19,6	6	aride
Haut-Atlas	377,5	17,4	14	Semi-aride
Anti-Atlas	185	17,2	7	aride
Bassin	243	17,8	9	Aride à semi-aride
Mirleft	48,85	17,53	1,77	hyperarides

I.5.2.4 L'humidité relative du bassin

L'humidité relative est liée à la température d'air et la pression atmosphérique. De manière générale, l'humidité moyenne relative est sensiblement élevée pendant l'année 2006 avec $72,19\% \pm 3,86$ par rapport à l'année 2007 ($69,54\% \pm 5,71$) et 2008 ($67,67\% \pm 8,23$). Le tableau ci-dessous expose les principales statistiques de la moyenne journalière, du maximum et du minimum journalier (Tableau I.5).

Dans la Figure I.11, on remarque les variations de l'humidité relative pour les trois dernières années à Agadir. Durant l'année 2006, on observe que ce paramètre dépasse 70% durant tous les mois à l'exception de novembre et décembre. Pour 2007, l'humidité dépasse ce seuil durant les mois de février, avril, août, novembre et décembre où la température moyenne est plus élevée ($>20^{\circ}\text{C}$). Par contre l'année 2008, est caractérisée par un RH élevé ($> 70\%$) pour les mois de juin, juillet, août, septembre, et octobre. Les fréquences des jours les plus humides ($\text{RH} > 70\%$) représentent 76% de l'ensemble des jours de l'année pour 2006, 64% pour 2007 et 70% pour 2008 (Figure I.12). En général, dans le bassin hydrologique de Sous-Massa, au littoral, l'humidité est importante par rapport aux autres régions à l'intérieur du bassin. L'humidité relative moyenne à Agadir pour la période 1998-1999 est 75,6 % et 37,7 % à Tiznit. Par contre, à Taroudant (80 km à l'Est de la côte) l'humidité relative moyenne décroît à 51,2 % (KHAIRI.F 2003).

Tableau I.5 : Description de l'humidité relative mensuelle dans la ville d'Agadir

Date	RH% (2006)	RH% (2007)	RH% (2008)
Janvier	75,10 ± 10,71	68,87 ± 16,64	60,87 ± 16,87
Février	75,93 ± 11,42	57,04 ± 22,40	75,57 ± 13,92
Mars	74,71 ± 11,10	67,65 ± 13,03	60,90 ± 17,02
Avril	71,23 ± 13,21	47,80 ± 23,17	72,03 ± 6,55
Mai	73,48 ± 6,39	64,77 ± 10,53	62,90 ± 17,18
Juin	73,21 ± 3,88	72,90 ± 5,50	71,60 ± 4,38
Juillet	73,65 ± 8,11	74,81 ± 4,48	66,58 ± 17,72
Août	75,77 ± 5,42	73,68 ± 5,04	75,16 ± 7,34
Septembre	70,07 ± 10,72	73,77 ± 8,92	78,10 ± 3,64
Octobre	72,84 ± 12,36	76,06 ± 8,16	68,71 ± 18,43
Novembre	64,93 ± 18,58	69,17 ± 13,90	70,47 ± 16,47
Décembre	64,50 ± 15,75	65,58 ± 11,62	71,52 ± 17,54
Moyenne	72,19	67,67	69,54
Maximum	75,93	76,05	78,10
Minimum	64,50	47,80	60,87
Ecart-type	3,86	8,23	5,71
Effectif	362	365	364

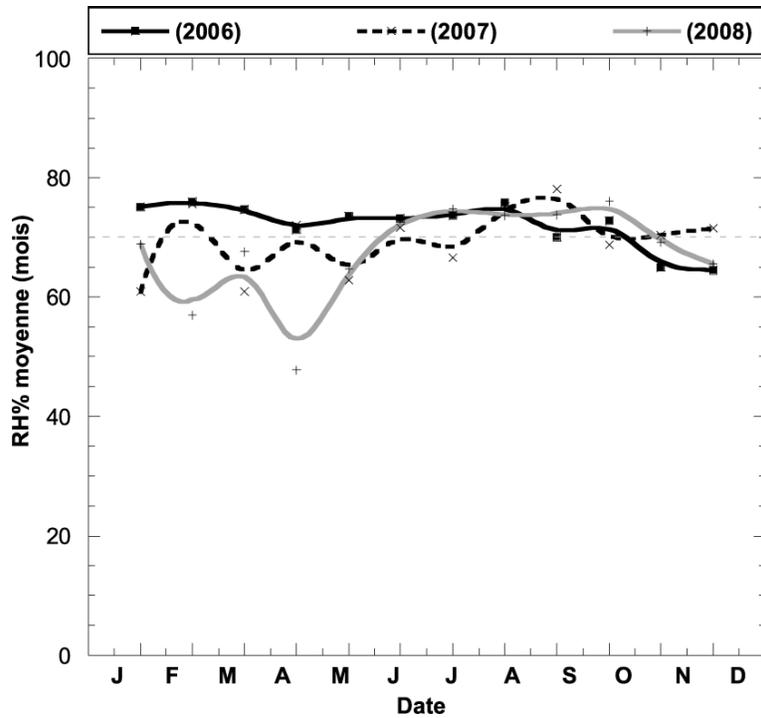
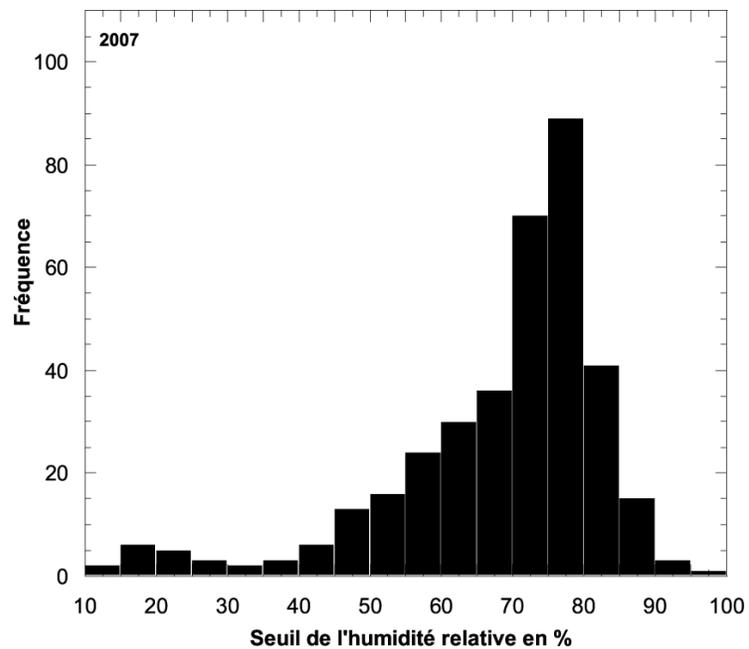


Figure I.10 : Évolution de l'humidité relative mensuelle durant les trois dernières années (2006-2007-2008) dans la ville d'Agadir.



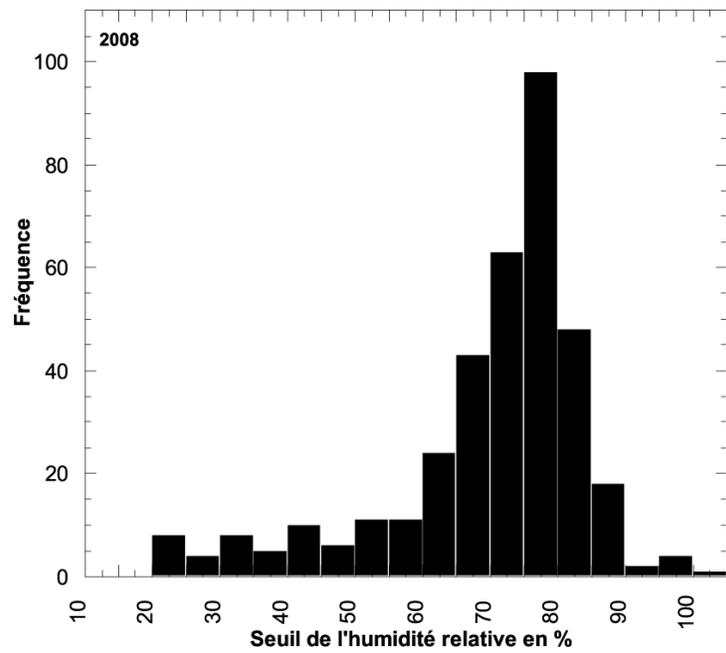
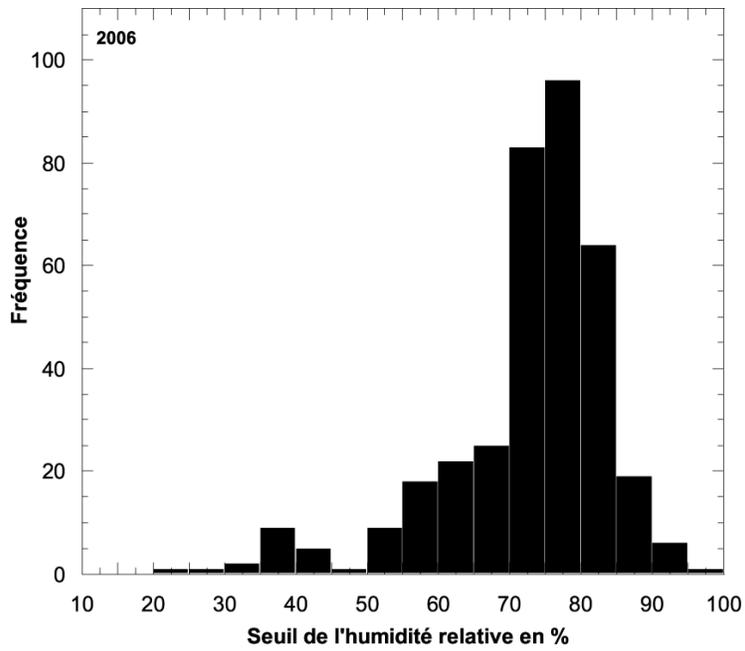


Figure I.11 : Fréquence de l'humidité relative (moyenne journalière) durant les années 2006, 2007 et 2008 dans la ville d'Agadir.

I.5.2.5 La vitesse et la direction du vent du bassin

Dans la ville d'Agadir, la direction et la vitesse du vent diurne présentent la même évolution pour l'année 2007. Le vent à une direction comprise entre 200° et 270° avec des vitesses qui ne dépassent pas en moyenne 4 m/s. Par contre durant la nuit ces deux paramètres du vent ont une évolution différente avec des directions de 100° et 200° dont les vitesses peuvent atteindre 2 m/s (Figure I.12).

On remarque durant cette année la dominance du vent de secteurs OSO et SSE (Figure I.13). En général, la fréquence des directions des vents enregistrées à la station météorologique d'Agadir, montrent l'importance des vents du secteur Ouest suivie des vents Est, SO, SE et S (Figure I.13). Les autres directions ont des fréquences faibles par rapport aux autres. Cette prédominance des vents d'Ouest à Agadir est due au fait que l'alizé maritime, de direction NNW à NE, est dévié, à cet endroit, par l'Atlas. Le vent d'Est, appelé localement «Chergui », est généralement fréquent en automne, à la fin de l'hiver et au début du printemps. Ce vent s'accompagne d'une élévation de la température et une diminution de l'humidité relative de l'air. La rose des vents établie à partir des données montre que les vents les plus violents sont du secteur WSW et ESE (vitesse > 5 m/s).

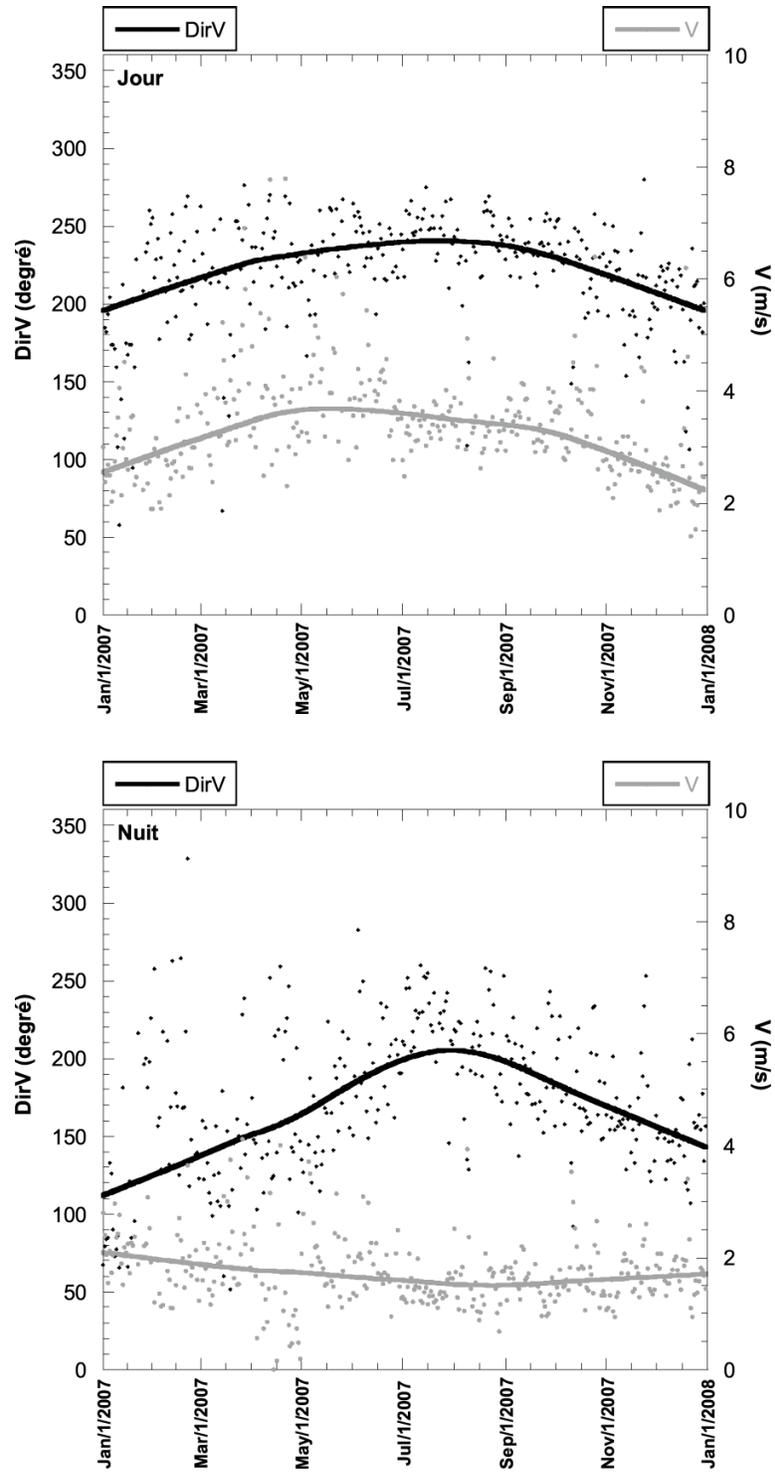


Figure I.12 : Evolutions des vitesses et direction du vent durant l'année 2007.

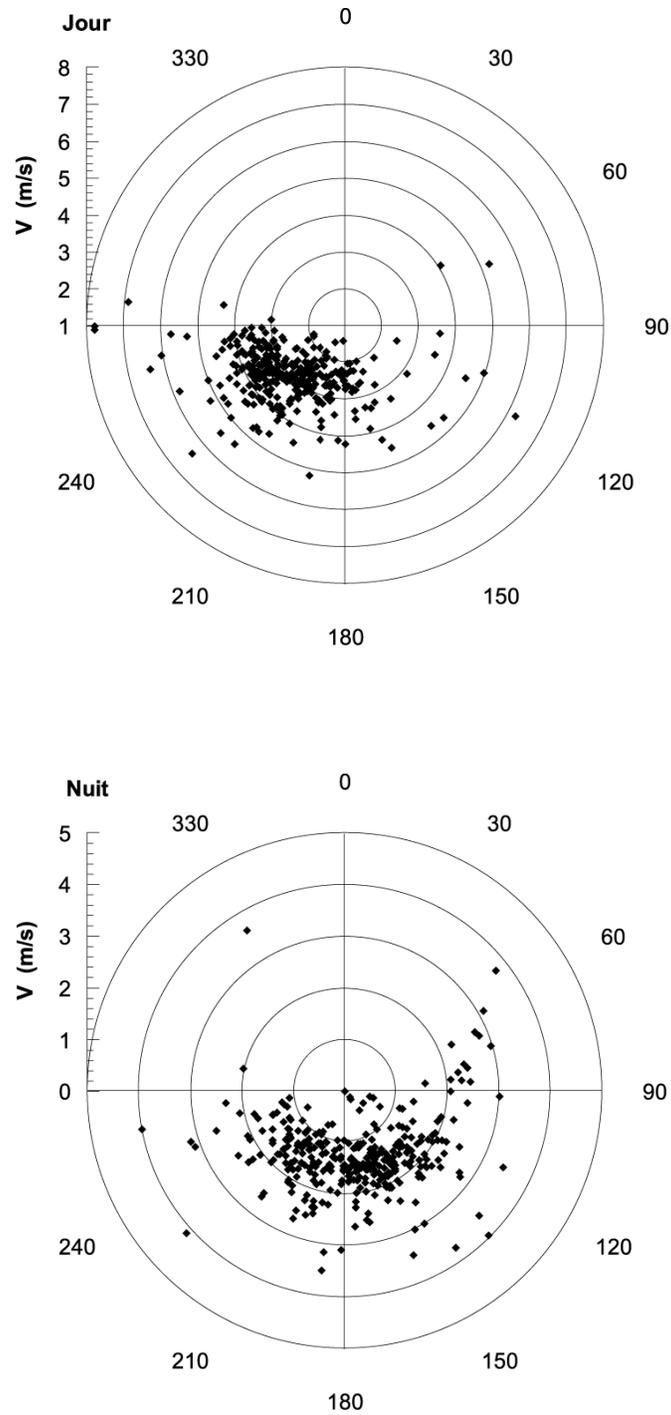


Figure I.13 : Caractéristique de la rose du vent diurne et nocturne durant l'année 2007 dans la ville d'Agadir.

I.5.2.6 Le brouillard

Le brouillard est l'obstacle à la vue le plus courant et le plus persistant en ce qui a trait à l'aviation. Nuage dont la base est au sol, le brouillard peut être formé de gouttelettes d'eau, de gouttelettes d'eau surfondue, de cristaux de glace ou d'un mélange de gouttelettes d'eau surfondue et de cristaux de glace.

A Agadir, les années 2006, 2007 et 2008 sont caractérisées par un nombre élevé de jours de brouillard (37, 34 et 26 jours respectivement). On trouve des brouillards durant tous les mois de l'année à l'exception de juin et décembre pour 2006, d'avril, mai et juin pour 2007 et avril mai juillet pour 2008 (Figure I.14). Ces phénomènes traduisent une humidité relative toujours élevée au littoral particulièrement en été. Elle est d'importance capitale notamment sur le couvert végétal d'autant plus que les précipitations sont minimales et irrégulières.

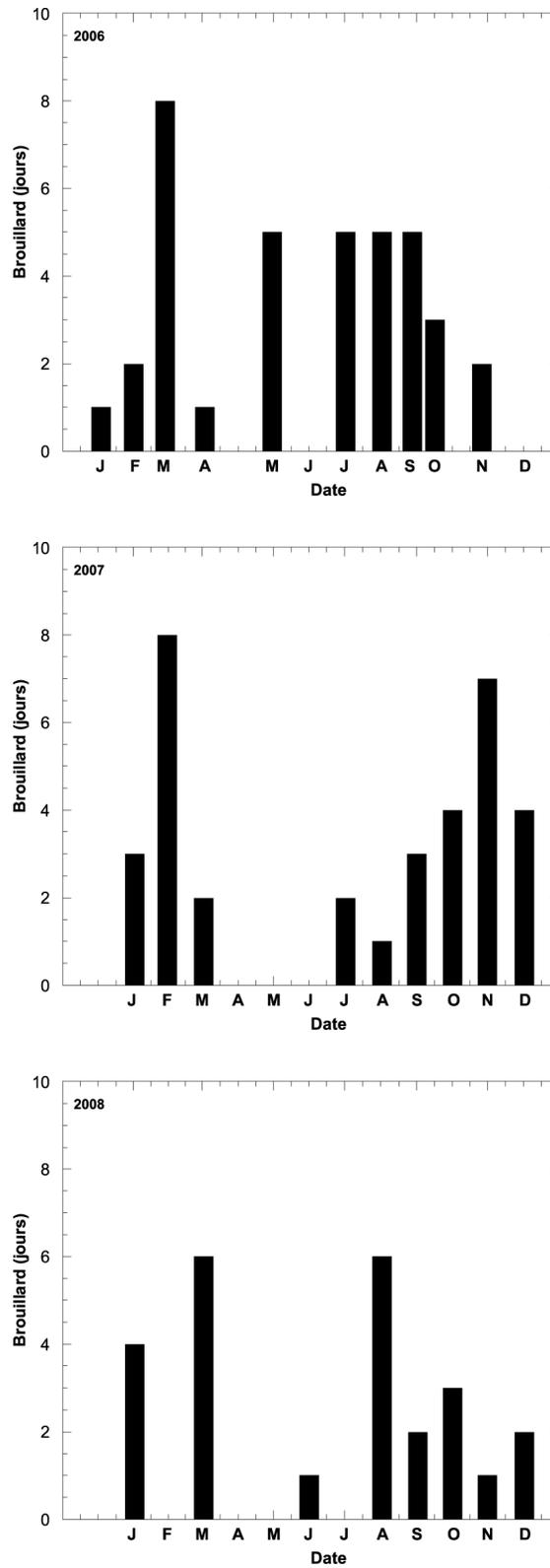


Figure I.14 : Nombre de jours de brouillard dans le bassin hydrologique de Sous-Massa (Agadir).

I.6 Conclusion

Les conditions climatiques citées précédemment pour le Maroc et essentiellement pour le bassin hydrologique de Souss-Massa ont une grande influence sur le régime des écoulements superficiels. Ceci peut être expliqué par la répartition irrégulière des ressources en eau dans le temps et dans l'espace. Ce sont surtout les précipitations qui constituent le facteur essentiel de cette répartition hydrologique des cours d'eau et de l'alimentation des nappes souterraines.

Aujourd'hui plus que par le passé, la question de l'eau se pose avec acuité. Cette inquiétude est due à la fois à la succession des années de sécheresse dans la majorité des régions du pays et aux comportements non maîtrisés des usagers. Ainsi, l'eau représente un défi majeur pour le développement économique dans une région comme le bassin hydrologique de Souss-Massa où il y a une forte augmentation de la consommation de l'eau due au développement explosif de l'agriculture, notamment depuis les années 70. De ce fait, il en découle une forte dépendance de l'agriculture de la disponibilité des eaux souterraines. Vient ainsi une surexploitation des nappes phréatiques au delà des capacités de recharge avec par conséquent un abaissement du niveau piézométrique (environ 2 m/an) et un assèchement des puits moins profonds. La situation de l'eau dans le Souss-Massa est devenue très critique avec le phénomène de sécheresse qui sévit périodiquement dans cette région rendant la région vulnérable aux problèmes de pénurie d'eau.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons de nouvelles sources complémentaires à partir de la condensation de l'air humide riche en gouttes d'eau. Le choix de cette région s'explique par le fait qu'il existe de sérieuses menaces hydriques surtout dans le milieu rural. En effet, notre objectif est d'évaluer le potentiel en vapeur d'eau atmosphérique récupérable (rosée, brouillard et pluie) durant une année d'étude. C'est dans cet esprit que nous avons décidé de réaliser une station de mesures de données météorologiques, des condenseurs de collecte de rosée et des filets à brouillard dans une région au sud du bassin hydrologique de Souss-Massa.

II.1 Introduction

Lorsqu'on cherche à déterminer la formation de la rosée sur des surfaces, en fonction de leur milieu extérieur environnant, on ne peut faire abstraction des paramètres météorologiques et des échanges énergétiques intervenant dans le changement de phase.

La condensation de la vapeur d'eau est un phénomène énergétique. En tenant compte de la chaleur latente de condensation de l'eau de $2,5 \text{ kJ g}^{-1}$ à 20°C (Beysens, 2006b), le rendement maximum théorique qui peut être espéré par refroidissement radiatif est voisin de $0,8 \text{ L m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ pour une puissance disponible de refroidissement de l'ordre de 60 à 100 W m^{-2} . L'analyse de ce phénomène est donc indissociable des facteurs climatiques du milieu extérieur. De même, les échanges d'énergie se traduisent en grande partie par les transferts radiatifs de grandes et courtes longueurs d'ondes à l'interface entre la surface et l'air. Enfin, l'ensemble de ces transferts ne peut être dissocié du milieu "fluide" c'est à dire l'air, au sein duquel ils s'effectuent et donc on ne peut ignorer les processus de l'écoulement de l'air à la surface du condenseur.

Dans le cadre de l'étude que nous conduisons dans ce chapitre, seule la connaissance de l'environnement climatique est nécessaire. Le but est de placer le phénomène de rosée dans son contexte afin de comprendre son fonctionnement et ses interactions avec les différents paramètres climatiques concerné. Nous nous focaliserons sur une approche physique du climat afin de cerner précisément le processus de formation de la rosée et les facteurs météorologiques entrant en jeu dans ce phénomène.

Nous décrivons également les moyens alternatifs aux méthodes classiques d'obtention d'eau à partir de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique : rosée et brouillard. Nous examinons la récupération du brouillard et étudions plus en détails comment la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique (phénomène de rosée) a pu être effectuée dans le passé et pourquoi celle-ci peut être envisagée maintenant avec de meilleurs rendements.

II.2 Bases de données météorologiques

Les variables météorologiques intervenant dans le phénomène de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique sont connues ; humidité relative, température ambiante, vitesse et direction du vent, nébulosité...En fait, elles découlent et induisent d'autres paramètres climatiques. Ils sont très nombreux et il n'est pas nécessaire de procéder à une énumération exhaustive des grandeurs physiques qui décrivent l'environnement climatique. Nous nous concentrerons sur quelques uns de ces paramètres en les resituant le plus possible dans leur contexte pour mieux cerner leurs influences dans le cadre du phénomène de la condensation de l'humidité atmosphérique et la formation de la rosée. Nous introduirons donc, si nécessaire ces variables à partir des lois physiques dans lesquelles ils se définissent.

II.2.1 L'humidité de l'air

La vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère est obtenue par évaporation au niveau des surfaces d'eau, ou par évapotranspiration des sols humides et du couvert végétal. Dans le cas de l'air saturé, la vapeur d'eau se condense pour donner les nuages, la rosée ou les précipitations. L'humidité de l'air peut s'exprimer de plusieurs manières : l'humidité absolue (H_a) ou relative (HR).

II.2.1.1 L'humidité relative

L'humidité relative est définie par rapport à la pression atmosphérique, à la température et à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Elle est exprimée en pourcentage et égale au rapport entre la pression partielle de vapeur (p_c) et la pression de vapeur saturante à la même température (p_{sat}) (Malardel, 2005) :

$$HR=100*\left(\frac{p_c}{p_{sat}}\right) \% \quad (II.1)$$

A chaque température, l'air humide correspond à une pression de vapeur saturante (p_{sat}). La part en eau en excès dans l'atmosphère se transforme à partir de ce point sous forme de liquide (Condensation) ou de glace (Solidification) en fonction de la température.

Quand la température (T_a) (ou la pression) de l'air s'accroît, p_{sat} augmente et la masse d'eau que peut contenir 1 m³ d'air augmente aussi. Pour un air de température et HR données, le diagramme psychométrique, qui représente la fraction massique d'eau dans l'air à différentes températures et HR , permet de définir à quelle température l'air est saturé en eau. Cette température est celle où la vapeur d'eau peut se condenser, c'est la température de rosée

(T_d). Pour donner un exemple, la température de rosée d'un air à 20 °C et d'humidité relative 80 % est de 18 °C. La température de rosée tombe à 10 °C si la HR n'est que de 25 %.

II.2.1.2 L'humidité absolue

Elle est liée à la masse volumique de l'air (ρ) et du rapport de mélange entre le contenu (massique) en vapeur d'eau et le contenu (massique) en air sec (X). Elle représente la masse d'eau par unité de volume d'air (kg/m^3) :

$$H_a = \frac{X}{(1-X)}\rho \quad (\text{II.2})$$

X peut s'obtenir à partir de la masse volumique de vapeur d'eau (ρ_v) et la masse volumique de l'air sec (ρ_a):

$$X = \frac{\rho_v}{\rho_a} \quad (\text{II.3})$$

Et ρ est fonction de pression de l'air (P) et de la température (T_a) :

$$\rho = \frac{(P - p_c) * (1 + X)}{287,055 * T_a} \quad (\text{II.4})$$

II.2.2 La température

II.2.2.1 La température ambiante (T_a)

En l'absence de perturbations au niveau du sol, les fluctuations de températures sont plus rapides et relativement plus importantes que celles de la pression. Ces transformations sont assimilées à des transformations isobares. C'est le cas du réchauffement matinal et du refroidissement nocturne qui constitue l'évolution diurne normale de la température de l'air dans les basses couches. Les transformations adiabatiques sont essentiellement des détentes ou des compressions subies par des particules atmosphériques au cours de leurs mouvements verticaux causés par les transferts thermiques entre le sol et l'air ou l'élévation de l'air provoquée par le relief ou le vent. Alors l'air en ascendance va se refroidir, ce qui va le rapprocher de son point de saturation, entraînant ainsi un changement de phase (Vapeur-Liquide). L'évolution de l'air se fait donc en considérant des transformations adiabatiques sèches et des transformations adiabatiques humides selon l'humidité de l'air. L'évolution adiabatique de l'air par ascendance se fait d'après un gradient de 1°C/100m pour l'air non saturé, et de 0.5°C/100m dans le cas contraire.

Dans notre système d'étude, la formation de rosée est influencée par la température ambiante (T_a) mais aussi par d'autres grandeurs physiques importantes telles que la température de rosée (T_d) et la température de la surface du condenseur (T_c) représentative des transferts conductifs et radiatifs de grandes longueurs d'ondes.

II.2.2.2 La température de rosée (T_d)

C'est la température à laquelle la pression partielle de vapeur d'eau (p_c) existant dans l'air serait égale à la pression de vapeur saturante (p_{sat}). Une surface au contact de l'air refroidie à cette température se couvre de rosée.

$$T_d = f(T_a, RH) \quad (II.5)$$

II.2.2.3 La température de surface du condenseur (T_c)

De nuit, de grandes surfaces telles que des toitures peuvent être refroidies de 1 à 10°C en dessous de la température ambiante par dissipation d'une énergie radiative de l'ordre de 60 à 100 W m⁻² par ciel clair (Berdahl, 1995 in Clus, 2007).

La température d'une surface résulte d'un équilibre entre l'énergie solaire qu'elle absorbe et l'énergie qu'elle rayonne vers l'espace. À cause de sa température, une surface émet de l'énergie mais elle en réfléchit aussi. L'énergie rayonnée et l'énergie réfléchie diffèrent par leur longueur d'onde : l'énergie réfléchie est de même nature que celle du Soleil (visible) et l'énergie rayonnée est de nature infrarouge. T_c dépend aussi des transferts convectifs et conductifs assurés par le vent.

II.2.3 Le vent

Le vent est lié à plusieurs facteurs tels que les forces de Coriolis, la distribution spatiale de la pression atmosphérique, les phases alternantes de refroidissement nocturne et de réchauffement diurne et de la topographie de l'environnement physique étudié. C'est en fait le soleil qui est en grande partie responsable de ce phénomène. Il chauffe les mers et les continents avec des rythmes différents. Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'airs qui les surplombent. L'air se met en mouvement, car il augmente de volume lorsqu'il est chauffé. Il devient plus léger et s'élève. Les vents d'alizés présentent un exemple de ce phénomène à l'échelle terrestre, où des masses d'airs chauds s'élèvent de l'équateur pour être remplacés par d'autres plus froides en provenance des pôles. Le vent sera donc décrit à partir de sa vitesse et de sa direction.

II.2.4 La nébulosité

La fraction de la voûte céleste occultée en un lieu et à un instant donné par tout ou partie des nuages est une grandeur mesurable, usuellement évaluée par l'observateur en octas qui correspond à une fraction de $1/8^{\text{ème}}$ de la voûte céleste. En l'absence de mention explicite, ce terme équivaut à la nébulosité totale, qui s'applique à l'ensemble des nuages présents dans le ciel au moment de l'évaluation. Des dénominations courantes de valeurs ou d'intervalles de valeurs de la nébulosité totale sont associées, non sans une certaine confusion d'ailleurs, à la description de l'état du ciel. Selon les critères les plus fréquemment adoptés, différents types de ciel peuvent de ce point de vue être distingués en priorité:

* *Le ciel clair* est entièrement ou presque entièrement dégagé de nuages, l'estimation de sa nébulosité étant inférieure à 1 octas

* *Le ciel couvert* est au contraire entièrement occulté par les nuages, l'estimation de sa nébulosité atteignant 8 octas ;

* *Le ciel nuageux* est un ciel dont plus d'une moitié est occulté par les nuages, l'estimation de sa nébulosité dépassant 4 octas sans toutefois atteindre celle d'un ciel couvert.

II.3 Bases physiques entrant en jeu dans la condensation

Nous présentons dans cette partie de ce chapitre, les différents rayonnements naturels d'origine, solaire, atmosphérique et tellurique intervenant dans le processus de condensation naturelle.

II.3.1 Rayonnements naturels

Bien que distant d'environ 150 millions de km de la Terre, le Soleil nous délivre une incroyable quantité d'énergie. Les rayonnements qui proviennent de cette source peuvent interagir avec les différents milieux, qu'ils s'agissent de l'atmosphère ou de la surface de la terre. Les différentes grandeurs et définitions liées au rayonnement sont décrites dans l'Annexe A.

II.3.1.1 Les généralités

Le rayonnement correspond à un transfert d'énergie par des oscillations rapides des champs électromagnétiques. Ces oscillations correspondent à des ondes qui ne nécessitent pas de milieu matériel pour se déplacer. Dans le vide, les seuls échanges énergétiques possibles sont les échanges par rayonnement. Ces rayonnements sont caractérisés par leur longueur d'onde (λ) ou leur fréquence ($\nu = C_m/\lambda$ où C_m est la vitesse de propagation de l'onde dans un

milieu donné). Toutes les ondes électromagnétiques se déplacent à la vitesse de la lumière, soit $C \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ dans le vide et également dans l'air. Le domaine dans lequel peut varier la longueur d'onde des ondes électromagnétiques est très vaste et correspond à ce que l'on appelle le spectre du rayonnement électromagnétique (Figure II.1).

Le domaine du rayonnement visible (0,4 – 0,7 μm) auquel l'oeil humain est le plus sensible est très étroit comparativement à l'ensemble du spectre. Il faut noter également que les rayonnements émis par la majorité des sources (Soleil, Terre...) sont composés d'un ensemble de longueurs d'ondes qui constituent leur spectre. La Figure II.2 décrit la variation relative (normalisée par rapport à leur maximum) de l'émittance spectrale (définie dans l'annexe A) et montre qu'une grande partie du flux d'énergie solaire se trouve dans le domaine de longueur d'onde compris entre 0,3 et 3 μm alors que celui de la surface terrestre est compris dans le domaine allant de 3 à 100 μm . Ces deux domaines sont appelés les domaines de courtes et grandes longueurs d'onde.

Le seul apport externe d'énergie pour le système constitué par la Terre et son atmosphère est le rayonnement solaire. C'est grâce à cette énergie que la vie existe et se maintient sur la planète.

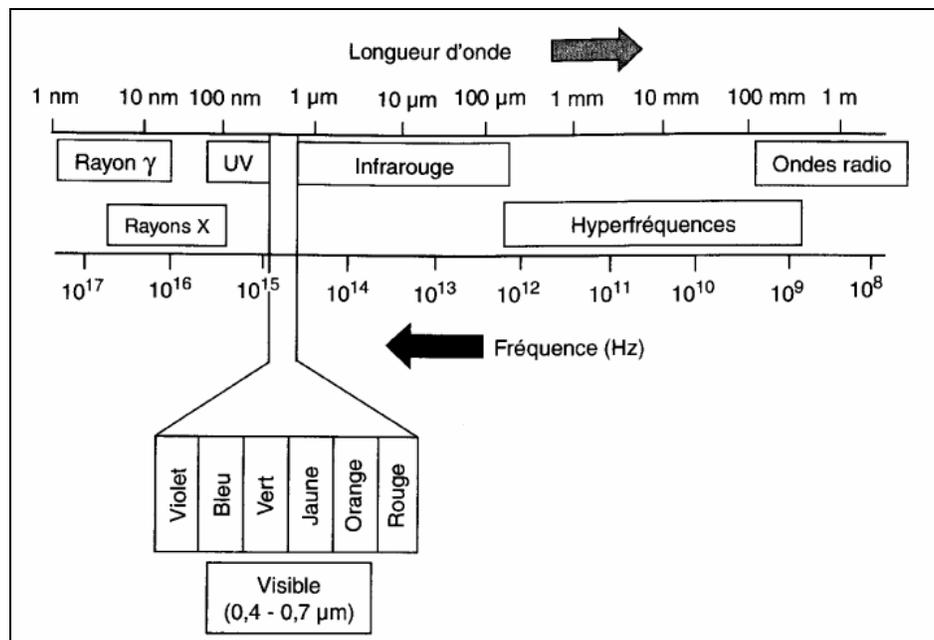


Figure II.1 : Spectre du rayonnement électromagnétique (d'après Guyot, 1999)

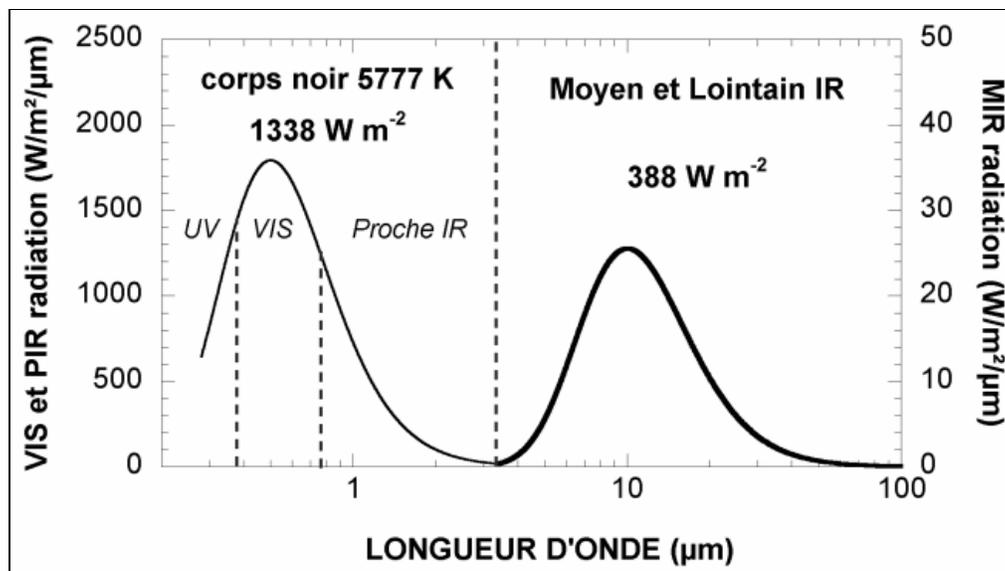


Figure II.2 : Emittance du corps noir selon les longueurs d'onde du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre. L'axe de gauche représente le rayonnement solaire idéal extraterrestre tel que reçu en haute atmosphère. L'axe de droite représente le rayonnement d'un corps noir à température ambiante (288 K).

II.3.1.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement incident de courte longueur d'onde est généralement appelé rayonnement global (R_G en W/m^2). Le terme global indique qu'il inclut une composante solaire directe et une composante atmosphérique diffuse, représentant 10 à 25 % de R_G pour un ciel dégagé et jusqu'à 100 % pour un ciel complètement couvert. R_G constitue un terme prépondérant dans le bilan radiatif pendant la période diurne ce qui en fait une variable climatique essentielle.

Seule une partie de ce rayonnement est absorbée par la surface, le reste étant réfléchi (R_g ou $a_s R_G$ en W/m^2). Cette fraction réfléchie définit l'albédo de surface, a_s , qui varie principalement selon le type de surface (Tableau A.1, Annexe A) : il varie de 4% pour l'eau et jusqu'à 90% pour la neige avec des valeurs intermédiaires dépendant du type de végétation (forêt 10-15%, cultures 15-25%) ou du type de sol (10 à 35 %).

II.3.1.3 Le rayonnement atmosphérique

La surface de la Terre reçoit un flux de rayonnement infrarouge thermique de grande longueur d'onde (souvent symbolisé par R_A , E_s ou R_l en W/m^2) en provenance de l'atmosphère. Il résulte des rayonnements émis essentiellement par les nuages, la vapeur d'eau, le gaz carbonique. Les aérosols en suspension participent également à cette émission

thermique (Goody, 1964 ; Liou, 1980 ; Lenoble, 1993 in Guyot, 1999). Plusieurs formules empiriques ont été proposées pour l'estimation du flux radiatif (E_s) de grande longueur d'ondes émis par le ciel à partir des paramètres météorologiques mesuré au sol.

II.3.1.4 Le rayonnement terrestre

On considère que la surface terrestre peut se comporter comme un corps noir à une valeur de l'émissivité près, définissant ainsi le corps gris dont le maximum de l'émittance spectrale se produit pour une longueur d'onde voisine de 10 μm (Figure II.2). L'émissivité des surfaces naturelles varie assez largement mais reste toutefois au-dessous de 1 (Tableau A.1, Annexe A). Le rayonnement terrestre (R_T en W/m^2) est presque totalement absorbé par l'atmosphère sauf dans la fenêtre atmosphérique entre 8 et 14 μm , lorsque le ciel est clair. En revanche, il suffit de nuages de quelques dizaines de mètres d'épaisseur pour absorber tout le rayonnement émis, et en renvoyer une partie vers le sol, empêchant ensuite le refroidissement de la surface.

II.3.1.5 Le rayonnement net

D'après les conventions proposées par l'Organisation Météorologique Mondiale (1990), le rayonnement net, R_n qui correspond au bilan de l'ensemble des échanges de rayonnement de courtes et grandes longueurs d'onde au niveau de la surface du sol peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R_n = (R_G - R_g) + (R_A - R_T) \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{II.6})$$

Les gains d'énergie pour la surface terrestre proviennent de l'absorption d'une partie du rayonnement global et du rayonnement atmosphérique, alors que les pertes (Figure II.3) correspondent aux fractions réfléchies des rayonnements, global ($a_s R_G$) et atmosphérique ($\rho_s R_A$) et au rayonnement terrestre, fonction de la température radiative (Norman et Becker, 1995).

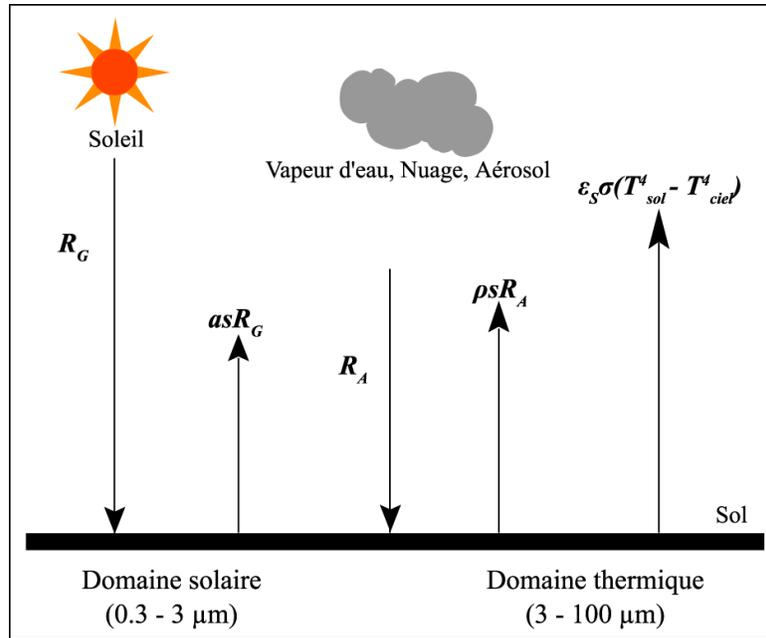


Figure II.3 : Échanges radiatifs simplifiés dans l'ensemble Soleil-surface terrestre-atmosphère.

D'après la figure II.3, le rayonnement net s'exprime sous la forme :

$$R_n = (1 - a_s)R_G + (1 - \rho_s)R_A - \epsilon_s \sigma (T_{sol}^4 - T_{ciel}^4) \quad (II.7)$$

Où a_s , ρ_s , ϵ_s , T_{sol} et T_{ciel} sont respectivement l'albédo, le coefficient de réflexion thermique, l'émissivité de surface, la température de surface du sol et la température du ciel.

II.3.2 Échange de flux entre la surface et l'atmosphère

II.3.2.1 Le bilan d'énergie

Le bilan énergétique d'un système est représenté comme la somme des flux énergétiques qu'il échange avec son environnement. Ainsi à tout instant, on peut écrire que le bilan d'énergie d'un corps est égal à sa variation d'énergie interne. Si l'on considère une surface (sol ou surface du condenseur) horizontale, l'équation suivante sera donc toujours vérifiée :

$$R_n = H + LE + G_o \quad (II.8)$$

R_n représente le rayonnement net, H le flux de chaleur sensible, LE le flux de chaleur latente et G_o le flux de conduction dans le sol. La convention de signe adoptée pour l'écriture de cette équation consiste à considérer les flux positifs lorsqu'ils sont dirigés de la surface vers l'atmosphère.

La Figure II.4 représente schématiquement et de façon la plus générale les bilans d'énergie de jour et de nuit. De jour, les apports énergétiques correspondent au rayonnement net. Les pertes d'énergie sont dues au flux de chaleur latente dans l'air (évapotranspiration), au flux convectif de chaleur (chaleur sensible) et au flux de chaleur par conduction dans le sol. De nuit les pertes de chaleur sont principalement dues au rayonnement net qui est alors négatif. Les apports énergétiques correspondent au flux convectif de chaleur dans l'air (qui est plus chaud que la surface du sol), au flux de chaleur latente si de l'eau se condense (rosée) et au flux de chaleur par conduction dans le sol, dont les couches profondes sont plus chaudes que la surface.

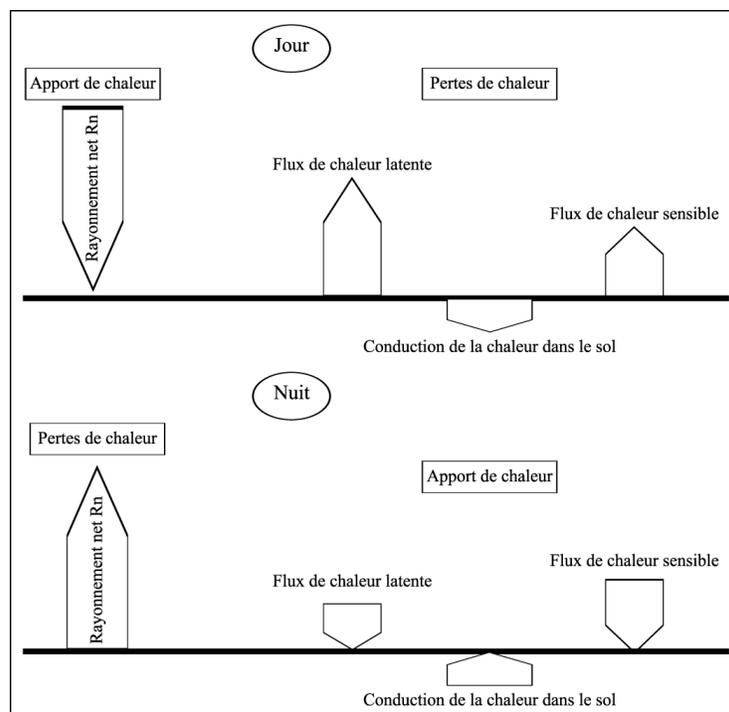


Figure II.4 : Représentation schématique des bilans d'énergie de jour et de nuit au niveau de la surface (D'après Guyot, 1999). Les flèches indiquent le sens des flux et leur longueur l'importance relative de chaque composante.

II.3.2.2 Le cycle de l'eau

Un système, quel qu'il soit, possède de l'énergie et cette énergie peut varier à la suite d'échanges entre deux systèmes, ou entre un système et l'extérieur. Les formes d'échanges de l'énergie sont la chaleur et le travail. Dans le système océan-atmosphère, l'énergie solaire évapore de l'eau et la vapeur d'eau ainsi formée acquiert de l'énergie potentielle en s'élevant dans l'atmosphère. Dans l'atmosphère, cette vapeur va restituer de la chaleur par

condensation et du travail par libération d'énergie potentielle lors des précipitations. Après avoir défini les principaux réservoirs d'eau sur Terre, nous pourrions définir les modalités de transfert qui les caractérisent. On estime à environ $1,4 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$ la quantité d'eau à la surface de la Terre, dont 97 % dans les océans et 2 % environ dans les calottes glaciaires et les glaciers. Elle est présentée dans quatre réservoirs de taille inégale ; le premier (gigantesques) regroupe les eaux océaniques, le second, plus de trente fois moins important, représente les eaux continentales et les deux derniers (infimes) concernent l'atmosphère (Figure II.5).

Les transferts entre ces réservoirs sont réalisés par l'évaporation, les précipitations et l'advection. Ainsi, le transfert de l'océan vers l'atmosphère marine est assuré par l'évaporation de $434 \cdot 10^{15} \text{ kg}$ d'eau chaque année. Un flux de retour moindre, de l'atmosphère marine vers l'océan, de $398 \cdot 10^{15} \text{ kg}$ d'eau met en évidence un déficit qui est compensé par l'apport des fleuves et des rivières ($36 \cdot 10^{15} \text{ kg}$ d'eau). De façon globale, il pleut moins sur les océans qu'il n'y a d'eau qui s'y évapore et il pleut plus sur les continents qu'il n'y a d'eau qui s'y évapore. L'équilibrage du cycle est assuré par l'advection atmosphérique et le transfert des fleuves et rivières vers l'océan mondial.

En analysant ce cycle nous voyons que les flux d'entrée dans un réservoir compensent les flux de sortie : le cycle de l'eau est un système dynamique en état stationnaire. Mais le temps de séjour d'une molécule d'eau dans un réservoir est variable. Le temps moyen de résidence en années (t_{mra}) est donné par la formule :

$$t_{mra} = \text{taille du réservoir} / \text{flux d'entrée (ou de sortie)} \quad (\text{II.9})$$

Ainsi, une molécule d'eau séjourne 3041 ans ($1320000/434$) dans les océans et seulement 9 jours ($11/434$) dans le réservoir de l'atmosphère marine. Cette variabilité du temps de résidence joue un rôle fondamental lorsque l'on associe à la molécule d' H_2O des éléments chimiques ou des gaz dissous (CO_2 par exemple).

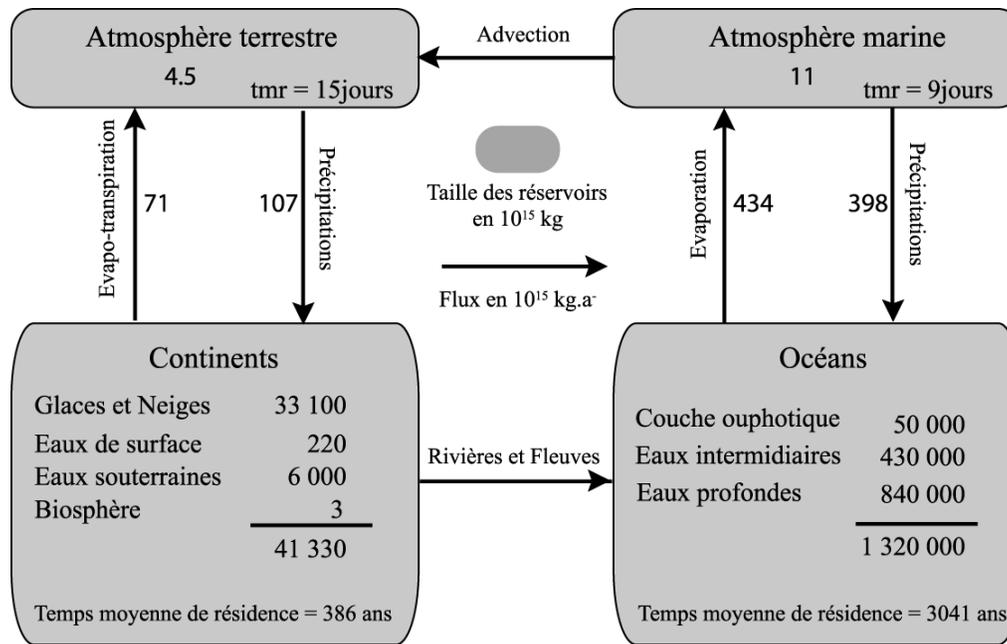


Figure II.5 : Le cycle d'eau (d'après BERNER et BERNER, 1996 et CHAHINE, 1992).

II.4 La formation de la rosée

Au cours de la nuit, sous un ciel clair que n'agite aucune perturbation sensible, le sol se refroidit par rayonnement infrarouge et transmet ce refroidissement aux couches d'air sus-jacentes, dont la température s'abaisse alors peu à peu. A des altitudes très faibles, l'évolution de ces couches d'air peut être considérée comme s'effectuant à une pression atmosphérique constante, qui est la pression au sol P , la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air reste elle aussi presque constante, et il en va de même pour la pression partielle p_c de cette vapeur d'eau.

La quantité d'eau dans l'atmosphère peut être obtenue à partir de sa pression partielle p_c au sein de la masse d'air. À température (et pression) donnée, la pression partielle ne peut excéder une valeur maximale sans qu'il n'y ait condensation, c'est la pression de saturation p_{sat} . Quand la température (ou la pression) de l'air s'accroît, p_{sat} augmente et la masse d'eau que peut contenir 1 m^3 d'air augmente aussi. Pour un air de température et HR données, le diagramme psychométrique, qui représente la fraction massique d'eau dans l'air à différentes températures et HR , permet de définir à quelle température l'air est saturé en eau. Cette température est celle où la vapeur d'eau peut se condenser, c'est la température de rosée. Pour donner un exemple, la température de rosée d'un air à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et d'humidité relative 80% est de $18 \text{ }^\circ\text{C}$. La température de rosée tombe à $10 \text{ }^\circ\text{C}$ si la HR n'est que de 25% .

II.4.1 Le refroidissement radiatif

De par les aléas de son bilan radiatif, la surface d'un objet peut s'être suffisamment refroidie pour provoquer la condensation directe de la vapeur d'eau contenue dans l'aire ambiant ; il s'y forme alors un dépôt d'eau (en général sous forme de gouttelettes), la rosée. Elle se dépose habituellement durant la nuit, par ciel clair et vent calme, sur des objets proches du sol et refroidis par le rayonnement nocturne, elle peut apparaître aussi sous forme de buée lorsque, en absence de rayonnement nocturne, un air chaud et humide rencontre un objet froid.

Le refroidissement radiatif s'appréhende très simplement comme le bilan des énergies émises et reçues par un corps. Ce corps reçoit le rayonnement solaire des courtes longueurs d'onde ($994,4 \text{ Wm}^{-2}$) ainsi que le rayonnement atmosphérique des grandes longueurs d'onde ($295,6 \text{ Wm}^{-2}$) (Figure II.2). Le même corps peut émettre par rayonnement IR, un maximum d'énergie équivalent à celle émise par un corps noir de même température. Si l'énergie émise est supérieure à l'énergie absorbée, il y a refroidissement radiatif.

L'énergie radiative globale reçue au niveau du sol de jour représente 1290 Wm^{-2} (somme des rayonnements UV, VIS, PIR, MIR et LIR). Le rayonnement solaire qui se décompose en rayonnements UV, Visible et Proche IR représentant respectivement 2,5 % ; 41,4 % et 33,2 % du rayonnement global. De jour (pour une température ambiante de 15°C), l'émission IR du ciel (Moyen et Lointain IR) représente 22,9 % de l'énergie totale reçue avec $295,6 \text{ W m}^{-2}$. De nuit, ce même rayonnement représente 100 % de l'énergie reçue.

A une température de 15°C , un corps noir émet $388,3 \text{ Wm}^{-2}$. Face au ciel et pour une atmosphère standard à 15°C , ce corps noir dissipera une puissance proche de 93 Wm^{-2} par rayonnement IR. Cette dissipation lui permet de se refroidir sensiblement sans apport d'énergie ; il s'agit du refroidissement radiatif. Le même corps noir porté de jour à 25°C par le rayonnement solaire émet $445,4 \text{ Wm}^{-2}$. Pour $T_a = 15^\circ\text{C}$ il dissipera alors près de 150 Wm^{-2} en IR (Figure II.2).

Différentes applications mettant en oeuvre ce principe sont étudiées. En certains lieux arides ou en déficit hydrique, de nombreuses études sont menées afin de quantifier la quantité de vapeur d'eau atmosphérique condensable et récupérable sur de telles surfaces froides (Nilsson, 1994, 1996 ; Muselli et al., 2002, 2006a; Beysens et al., 2003, 2005a, 2007ab; Berkowicz et al., 2004 ; Sharan et al. 2007).

II.4.2 La condensation de la vapeur d'eau

De l'eau circule constamment entre les réservoirs qui forment l'hydrosphère ; elle quitte la surface des océans, des lacs, du sol ou de la végétation qui transpire, pour se retrouver dans l'atmosphère où son séjour est bref, en moyen d'une dizaine de jours contre des milliers d'années pour les océans. Cette eau atmosphérique se déplace d'une zone à l'autre sous forme de vapeur, elle retourne au sol sous formes de précipitation, de brouillard et de rosée. La quantité de l'eau dans l'air est estimée à $2\,900\text{ km}^3$ d'eau douce, dont 98 % d'eau-vapeur et 2 % sous forme de nuages, un chiffre comparable aux ressources en eau liquide renouvelables sur les terres habitées ($12\,500\text{ km}^3$). L'épaisseur moyenne est 2 à 3 cm, ce que correspond à 9 jours de pluie et un renouvellement d'eau atmosphérique 40 fois par année (Hufty, 2001). La répartition spatiale de la vapeur d'eau est irrégulière et elle est liée à la température.

La rosée est le résultat d'une transition de phase dans lequel la vapeur d'eau est transformée en liquide quand elle entre en contact avec une surface. La condition fondamentale pour la formation de rosée est que la température de la surface sur laquelle la condensation a lieu soit inférieure ou égale à celle du point de rosée. Or, la condensation de la vapeur sur une paroi refroidie donne naissance à deux types de phénomènes qui se caractérisent par l'aspect visuel du condensat formé (Figure II.6). Dans le premier cas le condensat recouvre la surface sous la forme d'un film continu et on parle de condensation en film (Guyer et al., 1999). Dans le second cas les gouttelettes liquides se forment sur la surface et on parle de condensation en gouttes. Les gouttelettes de rosée s'organisent selon un ordre particulier. A leur naissance sur une surface, elles sont de très petites tailles (quelques millièmes de millimètres). Elles grossissent peu à peu en agglomérant les molécules de vapeur autour d'elles. En augmentant de taille, elles vont se toucher et fusionner. Ce phénomène est qualifié de coalescence. Elles forment alors une nouvelle goutte, plus grosse, de même forme, mais qui occupe moins de place que les gouttes avant fusion. Le support reste ainsi sec sur presque la moitié de sa surface (Beysens, 1995).

Lors de la condensation, les gouttelettes venant de la phase vapeur entrent en contact avec la surface du condenseur. Le taux de nucléation dépend des propriétés de mouillabilité de la surface, et plus spécifiquement, de la zone de contact entre la goutte et la surface (Figure II.7). L'angle de contact θ est nul, lorsque l'eau forme un film, et maximal (180°) pour une goutte de liquide qui ne mouille pas la surface (séchage complet), cette croissance laisse sèche une partie importante du support (45 % idéalement) (Zhao et al, 1995 ; Beysens, 1995, 2006b)

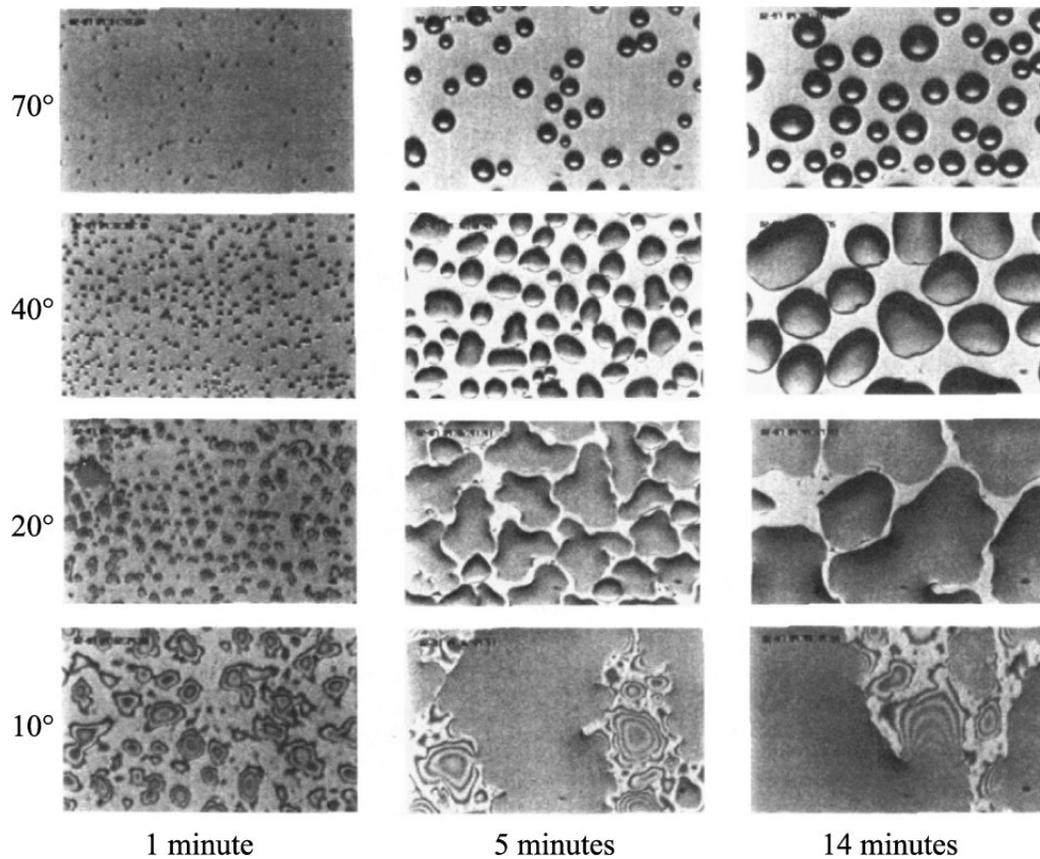


Figure II.6 : Les types de condensation de la vapeur d'eau au contact d'une paroi dont $T_c < T_d$.
 Chaque colonne représente les modèles observés à quatre emplacements différents selon
 l'angle de contact (Zhao et al, 1995).

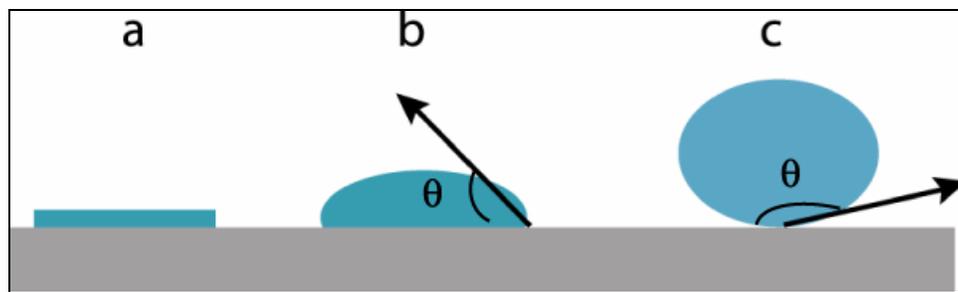


Figure II.7 : Différents contacts entre la gouttelette de vapeur d'eau condensée et la surface
 dont $T_c < T_d$. (a) : Liquide mouillant parfaitement le solide avec $\theta = 0$. (b) : Liquide mouillant
 partiellement le solide, angle de contact $\theta < \pi/2$. (c) : Liquide ne mouillant pas le solide, angle
 de contact $\theta > \pi/2$.

II.4.3 Transferts thermiques au niveau du condenseur

Les paramètres climatiques liés à la condensation de l'aire humide permettent de définir les effets des différents transferts d'énergie entre la surface du condenseur et l'air. La température d'un substrat dépend de plusieurs facteurs. Les échanges de chaleur peuvent se faire par conduction, avec le sol ou par convection avec l'atmosphère elle-même, ou enfin par radiation. Il faut aussi considérer le processus de condensation lui-même, qui s'accompagne d'une production de chaleur latente, chaleur qui fait augmenter la température du substrat. Les phénomènes radiatifs sont de grandes ou de courtes longueurs d'ondes. Le flux radiatifs de grandes longueurs d'ondes sont émit par l'atmosphère (R_l) ou par la surface du condenseur (R_c). Le rayonnement atmosphérique peut être abordé par le biais des grandeurs physiques telles que l'émissivité (ϵ_s) et la température du ciel (T_s). Le rayonnement infrarouge de la surface sera caractérisé par la température (T_c) et l'émissivité (ϵ_c) de cette surface.

Les échanges radiatifs ont, pour simplifier, deux actions antagonistes : chauffage, par le rayonnement solaire, et refroidissement, principalement dans le domaine infrarouge. Le jour, le chauffage l'emporte sur le refroidissement. La nuit, c'est le contraire, le substrat se refroidit. Bien évidemment, les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère limitent le refroidissement infrarouge. Le refroidissement peut même s'annuler quand la couverture nuageuse est dense.

Dans le cadre des transferts thermiques, nous exposerons les transferts thermiques relatifs à la surface du condenseur. La surface du système que nous étudions est sollicitée par les paramètres climatiques liés à des composantes énergétiques et aérauliques (Figure II.8). Les échanges mis en jeu sont de plusieurs types :

* *Les transferts radiatifs de grandes et courtes longueurs d'ondes* à l'interface entre la surface et la voûte céleste nocturne, conduisant à un abaissement de température (Echange radiatifs R_l).

* *Les échanges de chaleur par convection*, incluant la diffusion thermique à travers le fluide en contact immédiat avec la surface du condenseur, ce qui entraîne une élévation de la température (T_c). Le refroidissement radiatif de la surface est à l'origine du phénomène de convection libre par l'augmentation de la densité de l'air au contact de la surface froide (Echange convectif R_{he}).

* *La condensation de la vapeur d'eau sur la surface du condenseur* correspondant à une puissance reçue positive due à la chaleur latente de condensation dégagée

au cours du transfert de matière (égale au signe près à la chaleur latente de vaporisation de l'eau d'environ $2,5 \text{ kJ g}^{-1}$ à 20°C ; Beysens, 2006b) (condensation R_{cond}).

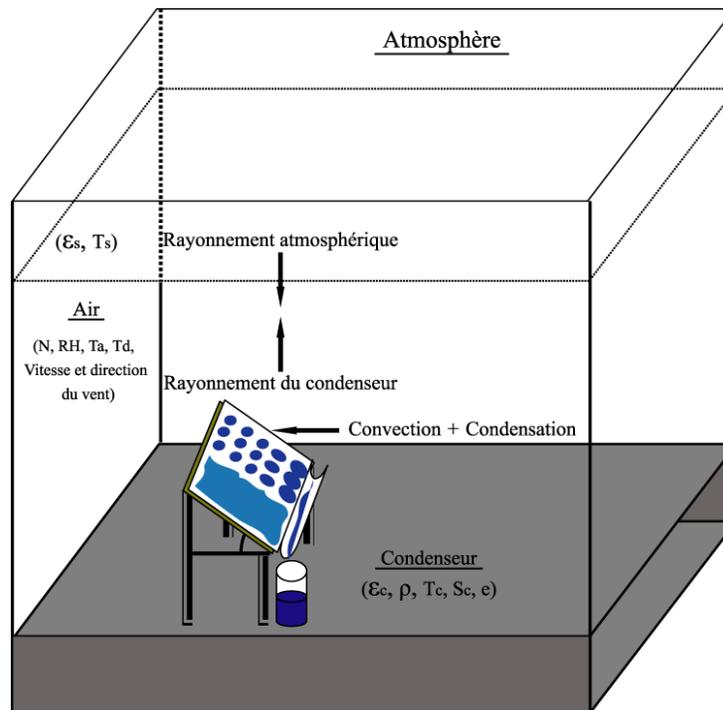


Figure II.8 : Les différents éléments climatiques et radiatifs qui influencent la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique sur la surface du condenseur.

II.4.3.1 Modèle d'estimation de la rosée

De nombreux modèles décrivent les transferts simultanés de chaleur et de matière le long d'une interface fluide / solide. Les modèles les plus utilisés pour la condensation de vapeur d'eau atmosphérique sont ceux de Monteith and Unsworth, 1990; Nilsson, 1994 ; Nikolayev *et al.*, 1996 ; Awanou and Hazoume, 1997; Nikolayev *et al.*, 2001 ; Wahlren, 2001 ; Jacobs *et al.*, 2004 ; Gandhidasan and Abualhamayel, 2005 ou encore la simulation de machines thermiques par Computational Fluid Dynamic « CFD » (Liu *et al.*, 2004 ; D'Agaro *et al.*, 2006, Clus *et al.*, 2009). Pour l'ensemble de ces auteurs, la modélisation se fonde sur le principe de continuité des conditions aux limites (soit à la surface du condenseur) en régime permanent. La conservation de la masse est respectée et le transfert de masse est déterminé à partir du bilan thermique global, tel que l'ensemble des flux de chaleur soit nul (Nikolayev *et al.*, 1996) :

$$\left(\frac{dT_c}{dt}\right)(MC_c + m_c C_w) = R_i + R_{he} + R_{cond} \quad (\text{II.10})$$

T_c : température de surface du condenseur (°C, K).

$M (= \rho e S_c)$: masse du condenseur (g) (Tableau II.1).

ρ : densité du foil (kg m^{-3})

e : épaisseur du condenseur

S_c : surface du condenseur (m^2)

m_c : masse d'eau (g, kg) en surface du condenseur en régime stationnaire.

$C_c ; C_w$: capacité calorifique du substrat de condensation et de l'eau ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

R_i : transfert radiatif (W).

R_{he} : transfert de chaleur (W) convectif et diffusif (condenseur - air).

R_{cond} : transfert de chaleur (W) due à la chaleur latente de condensation λ_c (J/g ou kg).

Le bilan radiatif (R_i) au niveau du condenseur peut être obtenu par la relation suivante :

$$R_i = R_l - R_c \quad (\text{II.11})$$

R_c est le flux de rayonnement émis par le condenseur, il peut être calculé par la formule suivante :

$$R_c = S_c \varepsilon_c \sigma (T_c + 273)^4 \quad (\text{II.12})$$

Où σ représente la Constante de Stephan-Boltzmann ($5,670 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) et ε_c est l'émissivité du condenseur (Tableau II.1).

R_l est le flux de rayonnement infrarouge thermique de grande longueur d'onde émis par l'atmosphère. Il est donné par la relation suivante (Pedro et Gillespie, 1982 et Campbell, 1977) :

$$R_l = S_c \varepsilon_c \varepsilon_s \sigma (T_c + 273)^4 \quad (\text{II.13})$$

Où S_c représente la surface du condenseur et ε_s est l'émissivité du ciel qui dépend de la température ambiante T_a et de la nébulosité N (Pedro et Gillespie (1982) cité par Muselli *et al*, 2006a).

$$\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_{s0} + \left(\frac{N}{8} \left[1 - \mathcal{E}_{s0} - \frac{8}{(T_a + 273)} \right] \right) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$\mathcal{E}_{s0} = 0,72 + 0,005T_a \quad (\text{II.15})$$

Le transfert de chaleur R_{cond} due à la chaleur latente de condensation est déterminé par la relation ci-dessous :

$$R_{cond} = L \left(\frac{dm}{dt} \right) \quad (\text{II.16})$$

Le transfert de chaleur convectif (R_{he}) est évalué par l'équation suivante :

$$R_{he} = S_c h_c (T_c - T_a) \quad (\text{II.17})$$

Le coefficient de transfert thermique h_c (W/m²K) dépend de nombreux paramètres qui peuvent être, la géométrie du système et la vitesse du vent. Il est défini tel que:

$$h_c = kf \left(\frac{V}{D} \right)^{1/2} \quad (\text{II.18})$$

Où f est un facteur empirique égal à 4WK⁻¹m⁻²s^{1/2} pour un plan incliné, selon Pedro et Gillespie, 1982 (cité par Muselli et al., 2006a), $D = (S_c)^{1/2}$ est la dimension du condenseur et k est un coefficients de correction d'ordre 1 qui tient compte des mesures effectuées sur les condenseurs en environnement extérieur (Muselli et al., 2006a) et de leurs géométries.

La variation de masse d'eau condensée sur la surface du condenseur s'exprime selon l'équation suivante :

$$\frac{dm}{dt} = S_c \lambda_m [p_{sat}(T_d) - p_c(T_c)] \quad (\text{II.19})$$

si $p_c(T_c) < p_{sat}(T_d)$, sinon $dm/dt = 0$.

Ici $p_{sat}(T_d)$ est la pression de vapeur saturante à la température T_d , $p_c(T_c)$ est la pression partielle de vapeur sur le condenseur et α_m est le coefficient de transfert massique, elle s'exprime ici en fonction du coefficient de transfert thermique h_c (Muselli *et al.*, 2006a) :

$$\alpha_m = 0,665 \frac{h_c g_f}{p_a c_a} \quad (\text{II.20})$$

avec g_f est un coefficient de correction d'ordre 1 dépendant de l'architecture du condenseur, p_a est la pression atmosphérique (Pa) et c_a est la chaleur spécifique de l'air ($\text{kcal kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

II.5 La rosée, source d'eau potable

II.5.1 Les condenseurs de rosée

Dans l'atmosphère, l'air se refroidit et il peut atteindre la température du "point de rosée". Par exemple, avec un air à 20° et d'humidité relative de 50%, la température de rosée est de 10°C (Figure II.9). A partir de ce seuil, l'eau en surplus condense et se retrouve sous forme liquide. Ainsi, la rosée se dépose sur la surface du condenseur dès que sa température est inférieure de quelques degrés à celle de la température de rosée de l'air ambiant durant la nuit. Alors, la rosée est soumise aux contraintes de coïncidences climatiques et géographiques et elle ne se forme pas toujours et n'importe où, mais il suffit que l'air soit tant soit peu humide et que le ciel soit raisonnablement dégagé pour que la rosée ait des conditions favorables pour se former. Beaucoup de pays chauds souffrent de l'absence d'eau. Pourtant, son taux en vapeur d'eau dans l'atmosphère y est parfois considérable, elle pourrait devenir une ressource en eau potable pour de nombreuses régions du monde. Même les pays les plus chauds possèdent de l'eau dans leur atmosphère. Par exemple, dans le Sahel, il ne pleut pratiquement jamais durant l'année, tandis que l'humidité absolue dans la couche inférieure de l'atmosphère peut atteindre une vingtaine de grammes par mètre cube grâce aux vents de mousson (Beysens *et al.*, 2000). Les techniques se développent ainsi pour récupérer l'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur. Il « suffit » que la température d'un substrat descende en dessous de la température de rosée, température où, comme expliqué plus haut, la vapeur d'eau est sursaturée et se transforme en eau liquide.

On peut ainsi distinguer deux grandes catégories de condenseurs de rosée :

* les « *massifs* » : de grande chaleur spécifique pour maintenir leur température la plus constante possible malgré l'apport de chaleur latente de condensation.

* les « *radiatifs* » : légers et thermiquement isolés, où l'énergie de refroidissement radiatif ne sert idéalement qu'à compenser l'apport de chaleur latente.

Dans les temps anciens, il semble que des condenseurs d'eau atmosphérique aient existé. Ils sont connus et inconnus en même temps : connus par le biais de multiples légendes, histoires, récit. Inconnus, car, à l'heure actuelle, nous n'avons que peu de documents confirmant la véracité de ces faits.

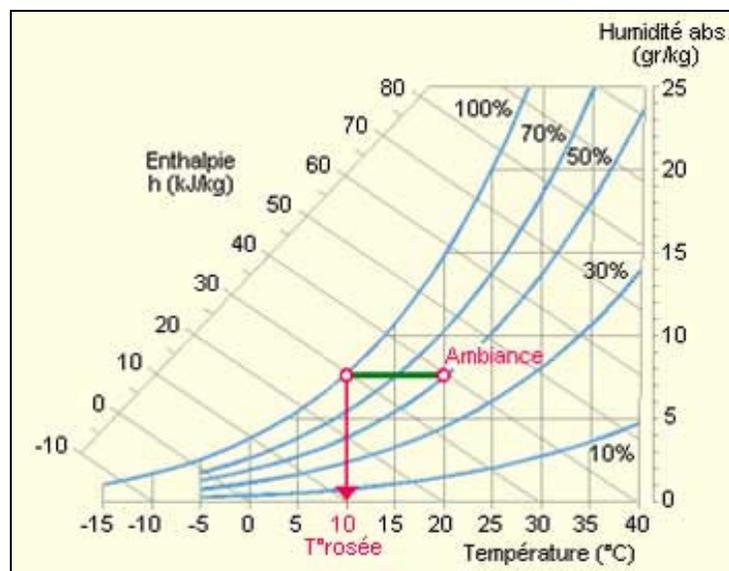


Figure II.9 : Diagramme de l'air humide. Par exemple, avec un air à 20° et d'humidité relative de 50%, la température de rosée est de 10°C.

II.5.1.1 Les condenseurs aériens massifs

L'exploitation de l'eau issue de la condensation de la vapeur atmosphérique est une ancienne technologie qui a été redécouverte dans les temps modernes. Il existe plusieurs témoignages, qui nous parlent de rosée captée de façon artificielle. Par exemple, entre juillet 1930 et fin 1931, l'inventeur belge Achille Knapen (lauréat de la Société des Ingénieurs de France) a construit à Trans-en-Provence en France une tour massive qui abrite en son centre un « puits aérien » haut de neuf mètres et d'un mètre de diamètre (Knapen, 1929) (Figure II.10). 18 mois d'effort, qui ne porteront pas leurs fruits. La structure n'a pas donné de bons résultats. Les meilleures nuits, Knapen ne récolta que la valeur d'un seau.

Knapen a été inspiré par les travaux de Léon Chaptal, Directeur de la station de physique et de bioclimatologie agricoles de Montpellier, qui a construit près de Montpellier en 1929 une pyramide haute de deux mètres et demi et large de trois mètres (Chaptal, 1932).

En 1930, la structure avait recueilli environ 100 litres au cours des six mois les plus chauds (Avril – Septembre) mais seulement la moitié de cette quantité en 1931, la période où les conditions étaient moins favorables. L'idée lui était venue suite aux résultats encourageants de l'expérience audacieuse d'un ingénieur russe, Friedrich Zibold. En 1900, dans la région de Crimée (Ukraine), alors qu'il était engagé dans les travaux de déforestation, Zibold découvrit de grands tas coniques de pierres, d'environ 600 m³ de volume. Dans la plupart des cas, des restes de tuyaux en terre cuite entouraient ces tumuli. Zibold en fit la conclusion, qui s'avéra fautive par la suite (Beysens, 1996a, 1996b), mais qui donna naissance à une construction étonnante, que ces tas de pierres étaient des condenseurs de rosée. Il décida que les tumuli trouvés servaient à alimenter en eau potable l'ancienne Féodosia.

Pour vérifier son hypothèse, Zibold entreprit deux œuvres remarquables. D'abord, en 1906, il écrivit un ouvrage expliquant les possibilités de condensation de l'eau à partir de l'atmosphère : *Rosée souterraine et nouvelle théorie de la naissance de l'eau de source du sol* (Milimouk et al., 1995). Puis, il construisit (Figure II.11) un condenseur fonctionnant sur des principes qu'il pensait identiques à ceux des anciens condenseurs. Pour cette expérience, Zibold choisit un endroit sur le sommet Tépé-Oba, près de Féodosia, à 288 m d'altitude. Il bâtit un condenseur en pierres en forme de coupe de 1,15 m de profondeur et de 20 m de diamètre. La coupe fut remplie de galets de 10 à 40 cm de diamètre, entassés en forme de cône tronqué de 6 m de hauteur et de 8 m de diamètre au sommet. Le condenseur commença à fonctionner en 1912, et donna jusqu'à 360 litres d'eau par jour. Les expériences durent cesser en 1915 par suite de fuites dans le socle. Suite à ces expériences, Zibold fait figure de pionnier en ayant construit un condenseur atmosphérique. Celui-ci, semble-t-il, a été le seul au monde à avoir un rendement non négligeable.

Les faibles quantités d'eaux collectées par ces condenseurs massifs s'expliquent par les caractéristiques des matériaux utilisés à l'époque. Des études menées au sein de notre équipe, qui tiennent compte des différents échanges avec l'atmosphère (Nikolayev et al., 1996) montrent que les grandes masses calorifiques qui caractérisent ces collecteurs ne permettaient pas de refroidissement nécessaire pour un bon rendement. Le rendement est moins important lorsque le rapport masse/surface s'élève. C'est le cas des condenseurs massifs du type Chaptal ou Knapen. Les bons résultats du condenseur de Zibold s'expliquent par le fait que sa structure en empilement de galets autorisait un refroidissement radiatif sur les couches externes, et que cet empilement ne permettait que de faibles contacts thermiques entre galets. Le rapport surface/masse de condensation se trouvait ainsi être relativement important.

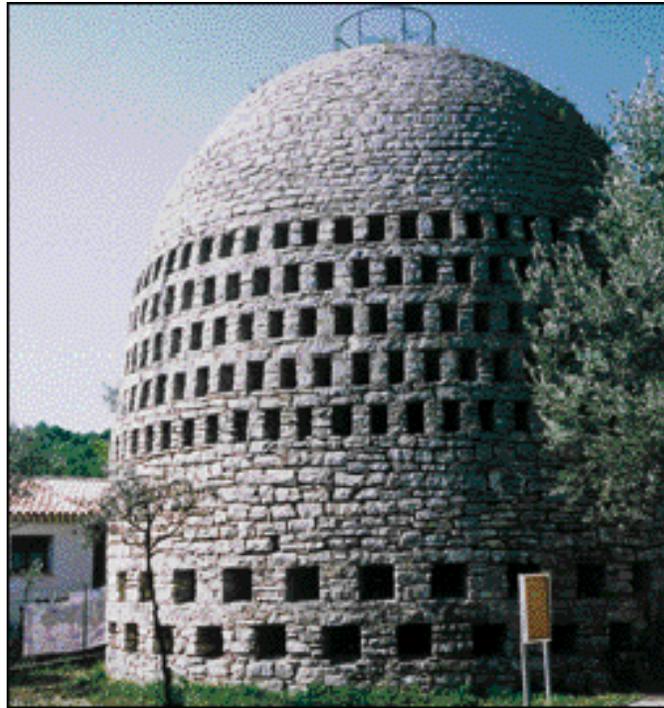


Figure II.10 : Le condenseur de A. Knapen à Trans-en-Provence (France) dans son état actuel
(photo : D. Beysens).



Figure II.11 : Le condenseur (maquette de reconstitution) de Zibold à Féodosia (Crimée,
Ukraine) (photo D. Vinçon).

II.5.1.2 Les condenseurs aériens radiatifs

La surface de certains matériaux (matériau réfléchissant pour la lumière solaire, absorbant pour l'infrarouge) peut atteindre des températures inférieures à celle de l'air ambiant de plusieurs degrés (jusqu'à 8 à 10 °C). De tels matériaux existent sous forme de films à base de polyéthylène ou sous forme de peintures à appliquer sur un support. Ces matériaux permettent de dégager des puissances frigorifiques jusqu'à 100 W/m², permettant de refroidir des structures et de condenser l'humidité de l'air jusqu'à des rendements de 0,8 L/m²/nuit, suivant les conditions météorologiques ambiantes. Plusieurs recherches partout dans le monde ont utilisé ces techniques pour l'irrigation des arbres ; en Israël, dans les années 60, des condenseurs formés de feuilles en polyéthylène ont été utilisés pour l'irrigation des plantes (Gindel, 1965) et aussi dans le Nouveau-Mexique (USA), des condenseurs en tôle blanchie ont procuré l'apport d'eau nécessaire à des arbres (Hopman, 1978).

Des recherches scientifiques pour construire un condenseur à haut niveau et bon marché ont été élaboré (Beysens et al., 1998, Muselli et al., 2002). Depuis 1994 et après trois mois de test d'un condenseur radiatif formé d'un plan incliné de 1,44 m² avec un matériau rayonnant peu cher, par Nilsson (1994), il s'agit d'un film de polyéthylène chargé en microbilles d'oxydes de titane (Nilsson, 1996, Vargas et al., 1998). Les études se poursuivent sur l'architecture de tels condenseurs radiatifs, le vent étant le plus grand ennemi, car il réchauffe la surface de condensation. Des structures en cônes inversés, ont été expérimentées au Bénin (Awanou, 1997) et récemment à Ajaccio en Corse (Clus, 2007) et aussi des condenseurs d'1m² inclinée avec un angle de 30° (Figure II.12.a, b). Le gisement quantitatif de rosée a été expérimenté dans de nombreux sites, un « réseau » de mesure se regroupant pour l'essentiel au sein de « l'OPUR » ou Organisation Pour l'Utilisation de la Rosée. En 1995 des expériences ont eu lieu sur des plaques horizontales de petite surface (0,25 m²) condensant la rosée dans deux sites en Tunisie. Le premier site se trouvait dans le désert (Tozeur) et l'autre en bordure de mer (Hergla, à 20 km au nord de Sousse). Le travail à Tozeur s'est effectué à la station météorologique de l'aéroport, ce qui a permis de bénéficier des facilités inhérentes à une station : température de sol, vitesse du vent, nébulosité... À Hergla, l'expérience a eu lieu sur une terrasse dégagée, à 10 m environ du sol. Ces expériences ont permis d'obtenir des données quantitatives pour valider le modèle de dépôt de rosée (Nikolayev et al., 1996). Elles ont aussi mis en évidence le rôle clé de l'architecture du condenseur dans l'utilisation du vent : le vent apporte la vapeur d'eau nécessaire au fonctionnement du condenseur mais en même temps le réchauffe et peut empêcher toute condensation. En 2006 des grandes surfaces ont été aménagées pour la construction d'usines de rosée en Inde (Figure II.12.d) (Clus, 2007).

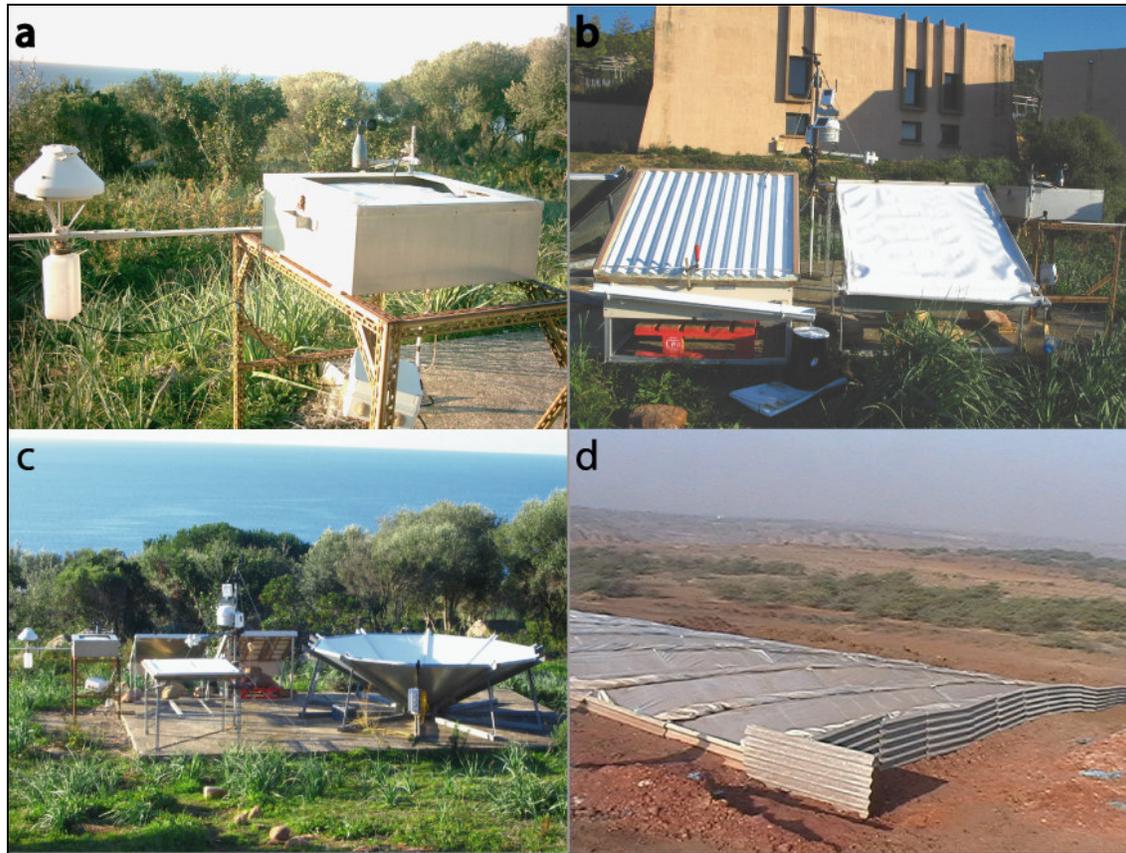


Figure II.12 : (b) Condenseurs d'1m² inclinée avec un angle de 30° et des structures en cônes inversés (c) ont été expérimentées à Ajaccio en Corse (Clus, 2007). (d) De grandes surfaces ont été aménagées pour la construction des usines de rosée en Inde (Clus, 2007).

II.6. La formation du brouillard

Le brouillard, est défini comme étant une nappe d'hydrométéore constituée de gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère. Il est parfois considéré comme un nuage très bas dont la base atteint le sol. On distingue quatre types de brouillard : le brouillard de rayonnement, le brouillard d'advection, le brouillard d'évaporation et le brouillard de mélange.

❖ Le brouillard de rayonnement est d'origine thermique : en présence de vent faible, et suite au rayonnement thermique de la terre, les plus basses couches de l'atmosphère se refroidissent et par conséquent la pression saturante de l'air diminue ce qui donne naissance aux gouttelettes d'eau. Ce type de brouillard se forme souvent au dessus des surfaces continentales et se dissipe au cours de la journée, lorsque l'air se réchauffe.

❖ Le brouillard d'advection : il se forme lorsque l'air relativement chaud et humide arrive sur une surface froide, ce dernier se refroidit par la base et provoque une condensation partielle de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Ce brouillard se forme surtout sur mer.

❖ Le brouillard d'évaporation apparaît quand une masse d'air froid surmonte une surface chaude (un étang ou un cours d'eau), l'air s'enrichit en humidité jusqu'à saturation, et le supplément d'eau se condense pour donner naissance aux gouttelettes d'eau formant le brouillard.

❖ Le dernier type de brouillard est le brouillard de mélange qui est le résultat de deux masses d'air contrastées en température et en humidité, proches de la saturation, une fois brassées conduisent un air saturé.

Par ailleurs, le phénomène du brouillard passe par 3 phases : après sa formation, vient sa maturation et sa dissipation. Lors de la phase maturation, la nappe du brouillard interagit avec son environnement par :

- * Le refroidissement radiatif au sommet du « brouillard »,
- * La diffusion turbulente,
- * La sédimentation des gouttelettes d'eau condensées.

Quant à la dissipation, elle apparaît en général quand le refroidissement au sommet du nuage est interrompu par le lever du soleil par exemple, ou quand il y a réchauffement du sol dû à la pénétration du rayonnement solaire qui provoque la dissipation par le bas du nuage.

La fréquence du phénomène brouillard est faible durant l'année et n'existe que dans peu d'endroits, car il dépend de la conjonction de plusieurs conditions climatiques précises. Il s'agit des régions couvertes par des brouillards côtiers ou de zones au-dessus de la mer de nuages dans le cas d'îles océaniques. L'eau du brouillard est utilisée dans les aires géographiques où la ressource hydrique est rare. Ainsi, pour extraire cette eau, il suffit de ramasser les gouttelettes d'une façon mécanique. Aux îles Canaries, les arbres, dits « Arbres Fontaines », remplissent naturellement ce rôle (Gioda et al., 1991, 1992). Au nord du Chili, les premières expériences concluantes avec des filets furent entreprises dès les années 60 par l'Université catholique du nord d'Antofagasta (Gioda et al., 1994).

Reprises par Schemenauer et ses collaborateurs (Schemenauer et al., 1991, 1992) à plus grande échelle dans les années 80, elles ont abouti à la récupération d'eau potable pour l'alimentation d'un petit village de pêcheurs. Cette ressource répond surtout aux besoins domestiques mais est également utilisée pour les activités agricoles, pour l'élevage, l'agroforesterie ou encore la foresterie. Pendant ses recherches, Schemenauer compte 47

régions, dans 22 pays, où l'eau du brouillard est collectée par la végétation ou par des capteurs artificiels (Pérou, République Dominicaine, Equateur, Guatemala, Mexique, Haïti, Namibie, Sultanat d'Oman, Yémen, Iran, Cap Vert, Népal, Inde, Philippines ou encore Hawaii).

II.6.1 Capteurs de brouillard

Les collecteurs de brouillard se composent des filets, généralement en polypropylène. Ce sont de larges surfaces de plusieurs mètres carrés tendus, entre deux poteaux, à 2 m du sol, là où le brouillard est le plus humide. Ils sont disposés verticalement et orientés dans le sens de l'arrivée du brouillard. Au passage de la brume, des gouttelettes d'eau se forment sur les mailles du filet. Elles tombent par gravité ensuite dans des gouttières qui alimentent un réservoir (Figure II.13). Depuis 1987 ce procédé a permis la diminution des coûts d'approvisionnement en eau potable pour les zones rurales du désert côtier chilien (Cereceda, 1992, 1998, 2000). Au nord du pays, de tels filets permettent d'alimenter en eau un village de pêcheurs. Malgré les années sèches, ces installations ont donné en moyenne 11 000 litres d'eau par jour (Cereceda et al., 1998).

À Tenerife (Canaries), des unités fonctionnent depuis 1996 dans la région d'Anaga et à Teno Rural Park. En Afrique du Sud, les longues périodes de sécheresse et de pénuries d'eau ont conduit les autorités à concevoir des programmes de recherches sur l'eau du brouillard pour l'approvisionnement des communautés rurales prioritaires. En 1995, la Water Research Commission of South Africa établit plusieurs sites pilotes dans les régions montagneuses de Tshanowa et de Woodbush mais également dans la région de Lepelfontein sur la plaine côtière ouest. Dans cette zone aride (moins de 70 mm de pluie par an), les rivières pérennes manquent et les problèmes de pollution des sources et des nappes phréatiques sont nombreux. La mauvaise qualité de l'eau est corrélée à une forte mortalité chez les enfants (Olivier et al., 2002).



Figure II.13 : Filet en polypropylène pour collecter l'eau du brouillard (Mirleft). Les gouttelettes du brouillard sont piégées dans les mailles du filet.

II.6 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons identifié le rôle que peut jouer la vapeur d'eau atmosphérique dans l'étude de la production d'eau, les conditions climatiques favorables à la condensation, les termes des échanges d'énergie à la surface des condenseurs et les techniques utilisées par différents chercheurs pour la récupération de la rosée.

Contrairement à la récupération des brouillards par des filets, qui ne peut se faire que dans certaines régions très humides et en altitude (comme au Chili ou sur les îles Canaries), la formation de rosée peut être importante même en atmosphère relativement sèche, comme dans les déserts continentaux. Il « suffit » que la température d'un substrat descende en dessous de la température de rosée, température où, comme expliqué plus haut, la vapeur d'eau devient sursaturée et se transforme en eau liquide. Beaucoup de pays chauds souffrent de l'absence d'eau, pourtant, les quantités d'eau dans l'atmosphère sous forme de vapeur y sont parfois considérables.

Cependant, et bien que ces deux sources d'eau (rosée et brouillard) soient utilisées dans différentes régions du monde où quantité et qualité d'eau se dégradent, leur étude combinée au Maroc n'est encore qu'à son commencement. L'objectif de la thèse est d'utiliser conjointement ces deux phénomènes naturels par l'installation d'une station au Sud Ouest du pays dans le bassin hydrologique de Souss Massa (Mirleft) incluant des matériels nécessaires afin de récupérer les variables météorologiques influençant la condensation de la vapeur d'eau.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les différentes méthodes de mesures à la station de Mirleft des paramètres climatiques, influençant la récupération des précipitations atmosphériques.

III.1 Introduction

L'expérience menée dans cette recherche a porté sur une étude de l'interaction entre le phénomène de la condensation de la vapeur d'eau (rosée) et les paramètres climatiques régnant dans la région sud ouest du Maroc (Mirleft). Le premier objectif était la caractérisation des événements de rosée avec la prise en compte des processus météorologiques de cette zone semi-aride. Le second objectif était de développer des méthodes d'estimation de la rosée en utilisant ces variables, qui permettent le suivi des processus de condensation à grande échelle.

La stratégie expérimentale a consisté à collecter la rosée sur quatre condenseurs orientés vers les quatre directions cardinales (Nord, Sud, Est et Ouest) et suivre son évolution durant une année, depuis le 1 mai 2007 au 31 avril 2008. Ce suivi a comporté des observations météorologiques (la température ambiante et de rosée, l'humidité relative, la vitesse et direction du vent, la couverture nuageuse, les événements de brouillard) à partir d'une station météorologique (Vantage pro II) de la marque DAVIS INSTRUMENTS. Les données sont recueillies toutes les 1/4 heures et stockées sur une base d'acquisition (Weatherlink) téléchargée toutes les quatre semaines à partir d'un ordinateur portable. L'alimentation électrique, nécessaire au fonctionnement de la station météo, est fournie par un panneau solaire couplé à une batterie.

Une étude sur la chimie et la bactériologie de la rosée a été aussi effectuée afin de déterminer la qualité de l'eau et de l'atmosphère où elle s'est formée. La comparaison entre l'eau de rosée et de pluie nous a donné une idée sur l'influence possible du substrat de condensation et de la contribution potentielle des aérosols atmosphériques. La conductivité électrique EC et le pH ont été mesurés immédiatement à la fin de chaque prélèvement. Les anions majeurs (Cl^- , NO_3^{2-} et SO_4^{2-}) et les cations majeurs (K^+ , Mg^{2+} , Na^+ et Ca^{2+}) ont été analysés par spectrométrie d'émission atomique au centre national pour la recherche scientifique et technique (CNRST).

Ce chapitre est consacré à la présentation des outils d'analyse qui nous ont été utiles dans le cadre de la caractérisation et de la modélisation du phénomène de la rosée et les données météorologiques. Nos démarches de caractérisation feront appel à des techniques statistiques telles que, par exemple l'analyse en composante principale (ACP) ou la classification hiérarchique ascendante. Les outils de modélisation couvrent un large spectre allant de la recherche de fonction de corrélations linéaires à l'utilisation de modèles de type "boîte noire" tels que les réseaux de neurones.

III.2 Les méthodes de mesures

III.2.1 Le condenseur standard

Le standard adopté par l'ensemble des chercheurs fédérés au sein de l'International Organization for Dew Utilisation « OPUR » pour évaluer le gisement de rosée est une mesure matinale du cumul quotidien de rosée sur un condenseur standard de 1x1 m² incliné à 30° avec l'horizontale. Les condenseurs sont recouverts d'un film polymère favorisant la condensation. La version produite et encore employée à ce jour est composée de charges minérales TiO₂ et BaSO₄ incorporées dans un film Polyéthylène basse densité (PEBD) d'épaisseur 0,35 mm (selon Nilsson, 1996; produit par OPUR, France, www.opur.u-bordeaux.fr, www.opur.fr). Le film est isolé du rayonnement du sol et de la convection thermique inférieure par 3 cm de Polystyrène expansé (condenseur fixe) ou 2 cm de Polystyrène extrudé (modèle de condenseur démontable). Beysens et al. (2003) ont montré que pour ce type de surface plane de condensation, la mesure sera optimale pour un angle d'inclinaison de 30° avec l'horizontale et le condenseur exposé dos au vent dominant nocturne (afin de limiter l'échauffement par l'écoulement de l'air ambiant). En raison du vieillissement du film du fait de son exposition en extérieur (abrasion par les poussières, irradiation UV), il est préférable de cumuler les volumes récupérés (i) par gravité et (ii) après raclage de la surface afin de mesurer le volume total condensé. Cette mesure standard a été appliquée en :

- * Tanzanie (Dodoma) ; Nilsson, 1994.
- * Suède (Göteborg) ; Nilsson, 1994.
- * France (Grenoble ; Ajaccio ; Bordeaux) ; Muselli *et al.*, 2002 ; Beysens, *et al.*, 2005a
- * Israël (Nizzana, désert du Néguev ; Jérusalem) ; Berkowicz *et al.*, 2004.
- * Pays Bas (Wageningen) ; Jacobs *et al.*, 2004.
- * Croatie (Zadar ; Komiža) ; Mileta *et al.*, 2004.
- * Ethiopie (Bahir Dahr) ; Cf. publication, de l'association OPUR (www.opur.fr, www.opur.u-bordeaux.fr)
- * Arabie Saoudite (Dharam) ; Gandhidasan and Abualhamayel, 2005.
- * Inde, Gujarat (Kothara ; Panandhro) ; Sharan, 2006.
- * Polynésie Française, Inde, Tamil Nadu (Yellagir i Hills); Clus O. 2007

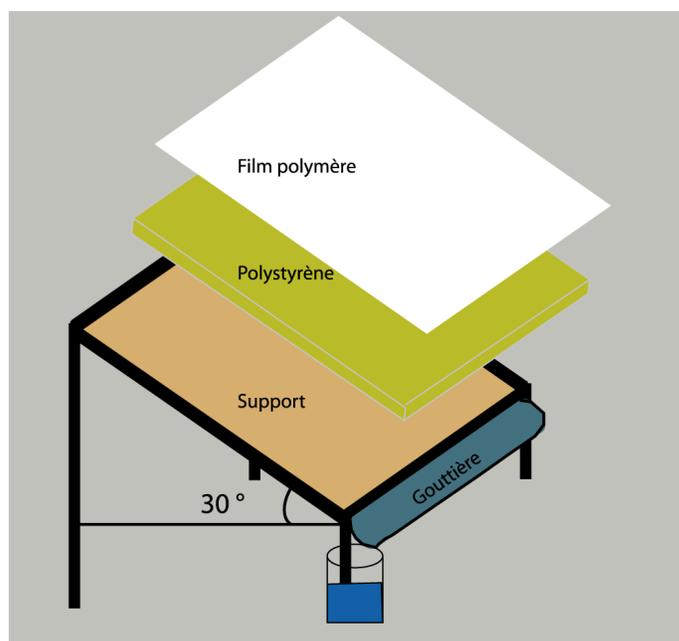


Figure III.1 : Condenseurs de rosée d'1 m² de surface utilisés par les chercheurs appartenant à l'OPUR. Il est constitué d'un support avec un angle d'inclinaison de 30°, d'un isolant type polystyrène (20 mm d'épaisseur), un film et une gouttière .

III.2.2 Films polymères (Foil)

Nilsson dans son travail de thèse (1994) a décrit la mise au point de films polymères réfléchissant le rayonnement visible (blancs opaques) et présentant une forte émissivité du rayonnement Infra Rouge thermique dans la bande ciblée 8-13 μm . Il décrit l'élaboration d'un film plastique blanc opaque d'environ 390 μm d'épaisseur. La matrice choisie est le Polyéthylène basse densité (LDPE, 92 % en volume) chargée de 2% en volume de Sulfate de Baryum BaSO_4 (diamètre moyen 0,8 μm) et de 5% en volume de dioxyde de Titane TiO_2 (diamètre 0,19 μm). 1 % en volume d'additif de type « tensioactif » surfactant alimentaire insoluble est incorporé afin de rendre la surface hydrophile et de faciliter la dispersion des charges minérales. Ce matériau produit à titre expérimental avait le défaut de n'être pas protégé des UV, ce qui entraîne une dégradation au bout de 12 à 24 mois d'exposition en extérieur (durées observées sur le site d' Ajaccio, Muselli *et al.*, 2002). L'émissivité infrarouge sur la bande 8 – 13 μm a été mesurée égale à 0,89 et égale à 0,91 sur l'ensemble de la bande d'émission d'un corps noir à 288,1 K. Sa réflectance du spectre solaire (visible et proche IR) est de 0,84 (Clus, 2007). En conditions nocturnes, le film fut testé pour la condensation à Kungsbacka en Suède (septembre – octobre 1993) et à Dodoma (Tanzanie, novembre 1993).

Le meilleur rendement en rosée sur la période était de 0,207 mm en Suède et de 0,124 mm à Dodoma.

Des films à base de polyoléfines et présentant des propriétés optiques sélectives continuent à être développés, notamment par la recherche de nouveaux pigments (Vargas *et al.*, 2000). Certains films sélectifs sont déjà utilisés en agriculture, tendus en serres et tunnels. Dans le premier cas, il s'agit de favoriser la croissance des plantes ce qui revient à conserver une transparence maximale pour le rayonnement visible (0,4 à 0,8 μm) permettant la photosynthèse. Dans un deuxième temps, il est important de réguler la température intérieure en limitant le refroidissement radiatif nocturne du sol. Des additifs sont donc incorporés pour augmenter l'absorbance du rayonnement IR tout en préservant une importante transmittance du rayonnement visible (Pied, 1978). D'autre part, des mélanges de charges minérales (particules d'aluminium, mica, calcium carbonate, talc et kaolin) ont été formulés afin de réfléchir le rayonnement proche Infrarouge (0,8 – 1,5 μm) et de limiter l'échauffement diurne. Ces mêmes mélanges permettent de diffuser le rayonnement solaire direct qui peut brûler les cultures (Kieser *et al.*, 2002). Enfin, un dernier type de films "polyoléfine" pour tunnels est teinté blanc diffusant (par ajout de TiO_2) pour un usage en hangar ou bergerie. Il s'agit d'un film LDPE dont la durée de garantie est de 7 ans. L'échantillon provient d'une installation en place depuis 12 ans. Sa réflectance au spectre solaire (0,28 – 2,5 μm) est de 0,71 pour une émissivité en moyen IR (bande 1,4 – 33,2 μm) de 0,89 mais de seulement de 0,81 sur la bande 8-13 μm .

III.2.2.1 Propriétés du film

Un matériau à bas coût a été développé par OPUR (www.opur.u-bordeaux.fr) pour favoriser la condensation de l'eau à sa surface. En effet, ce matériau se comporte comme un corps "noir" dans l'infrarouge et comme un corps "blanc" dans le visible, c'est-à-dire qu'il est capable d'émettre fortement de la radiation en IR en cycle nocturne (pour se refroidir) et réfléchir de la radiation lorsqu'il est éclairé pendant le cycle diurne. De plus, il possède un caractère hydrophile permettant de récupérer par gravité (matériau incliné) une grande quantité d'eau afin d'éviter une perte par évaporation le matin. En plus, ce matériau résiste aux radiations UV solaires, surtout en période estivale. Compte tenu de ce cahier des charges, le matériau développé est composé d'une matrice polyéthylène chargée en microbilles d'oxyde de titane (TiO_2) et de sulfate de baryum (BaSO_4) auxquelles un tensioactif et un anti-UV ont été ajoutés. D'une épaisseur de 0,3 mm, il peut recouvrir des structures planes pour la production d'eau.

Après une année de test au laboratoire de l'université de Corse/CNRS d'Ajaccio, ce matériau innovant a été décliné sous forme de peintures (blanches ou translucides) pour élargir sa palette d'utilisation (peinture sur tôle, fibrociment, tuiles etc.). Les résultats obtenus à l'aide de la peinture radiative sont nettement meilleurs que ceux obtenus avec des matériaux issus du commerce.

Le prix de revient de ces matériaux est très bas afin de pouvoir être mis en oeuvre sur de grandes surfaces. Et ce d'autant plus que le développement de ces systèmes se fera dans un premier temps dans un contexte socio-économique complexe et à destination des pays en voie de développement.

III.2.3 La station météorologique

La station météorologique automatique Vantage Pro 2 sans fils se décline en 4 versions selon leur dotation en capteurs et selon le type d'abri qu'elles possèdent (classique ou à ventilation forcée). Elle comporte trois sous-ensembles :

- Les circuits d'interface pour les capteurs appelés ISS (*Integrated Sensor Suite*). Il s'agit d'un assemblage compact formé d'un anémomètre-girouette, d'un pluviomètre, d'un thermo-hygromètre dans son abri et d'un coffret étanche renfermant la boîte de jonction des capteurs ainsi que l'émetteur. Un panneau solaire et une pile au lithium assurent l'alimentation de l'ISS.

- L'unité centrale qui gère l'acquisition et le stockage des données (console d'affichage/récepteur). La console d'affichage peut recevoir les données provenant de l'ISS jusqu'à 300 m (dans des conditions idéales). Elle est alimentée par un adaptateur secteur (fourni) et possède une alimentation de secours par piles.

- Le logiciel WeatherLink permet l'affichage des données sur un ordinateur.

III.2.3.1 Les capteurs

Le but de cette étude est de quantifier l'eau condensée sur la surface du condenseur et déterminer les variables climatiques qui influencent la formation de la rosée. Pour s'y faire, plusieurs capteurs ont été mis sur place :

➤ **Pluviomètre**

La quantité totale de précipitations atteignant le sol est représentée par l'épaisseur équivalente qu'aurait une lame d'eau uniforme sur une surface horizontale. La hauteur des précipitations est exprimée en mm. Les pluviomètres sont les instruments les plus couramment utilisés pour faire les mesures. Les appareils classiques nécessitent un relevé quotidien, alors que les appareils enregistreurs peuvent être reliés à une station météorologique automatique. Dans la station de Mirleft, un pluviomètre automatique (précision de $0,20 \text{ mm} \pm 4\%$) a été placé sous la gouttière de l'un des 4 condenseurs (Figure III.2.f), pour les autres, ils ont été équipés par des bidons. Afin d'adapter ce système à nos mesures, on a calibré le pluviomètre par des déversements de 5 litre d'eau goutte à goutte, soit des conditions approchant un écoulement de rosée.

Les autres paramètres sont mesurés par pas de temps de 15 minutes et transmises sans fil à la console par le boîtier (b) (Figures III.2 b) :

➤ **Anémomètre à coupelle**

La vitesse du vent est généralement exprimée en m/s, mais en météorologie, elle peut être également exprimée en nœuds. Selon les recommandations de l'O.M.M (1990) la direction du vent est indiquée en degrés mesurés à partir du Nord géographique, dans le sens des aiguilles d'une montre. La direction du vent est celle d'où il souffle. La Vitesse du vent (résolution $0,10 \text{ m/s}$, précision 5%) et sa direction (résolution 1° , précision 5%) sont mesurées à 1 m au dessus du toit de la station ($5,60 \text{ m}$ au dessus du sol) (Figure III.2.a). Ces mesures permettent d'avoir des informations sur les conditions de vent dans l'environnement immédiat du poste d'observation. Les vitesses du vent qui sont mesurées, sont plus faibles qu'à 10 m (hauteur utilisée par les réseaux météorologiques). Pour estimer la vitesse du vent à la hauteur normalisée, il est nécessaire d'appliquer une correction qui tient compte de la forme du profil du vent qui dépend du paramètre de rugosité de la surface du sol en utilisant l'équation suivante (Monteith et Unsworth, 1990) :

$$V_z = V_{10} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_c}\right)}{\ln(10/z_c)} \quad \text{(III.1)}$$

avec V_z (m/s) la vitesse du vent à la hauteur Z (m), V_{10} la vitesse du vent à 10 m et z_c la rugosité de la surface du sol.

➤ ***Température ambiante et Humidité relative***

La température exprime le degré de chaleur ou de froid de l'atmosphère en un lieu mesurée par un thermomètre (résolution de 0,1 °C, précision 0,5 °C). L'humidité relative (résolution 1%, précision 5%) exprime, en pourcentage, la quantité de vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air par rapport à la quantité maximale qu'il pourrait accepter à la même température. Ces deux paramètres sont mesurés à l'ombre dans un abri équipé d'une ventilation active (Figure III.2.c).

➤ ***Capteurs d'arrosage foliaire***

Pour connaître la durée d'humectation des plantes, Guyot et Hanocq (1974) ont élaboré un dispositif qui permet d'avoir une information qualitative sur la présence d'eau liquide sur les feuilles. Il suffit de mesurer le temps (dt) pendant lequel le capteur a répondu « mouillé » c'est à dire le temps de condensation sur les feuilles. Les capteurs d'arrosage foliaire (AF) utilisés dans ce travail (Figure III.2.e), fonctionnent sur le même principe. On a placé deux capteurs au niveau des condenseurs : AF1 horizontal, AF2 incliné à 30°. Le circuit imprimé des capteurs a été placé sur une isolation afin d'en augmenter le refroidissement radiatif et afin que sa température de surface approche celle du toit des condenseurs. Les valeurs sont analysées en tant que binaire $AF = 15$ (condensation) ou $AF = 0$ si < 15 (pas de condensation).

➤ ***Sondes à résistance thermique***

Les sondes à résistance thermique (résolution 0,1 °C, précision 0,5 °C) sont placées sur la surface de deux condenseurs (Figure III.2.d). Elles permettent de mesurer la température du film polymère.

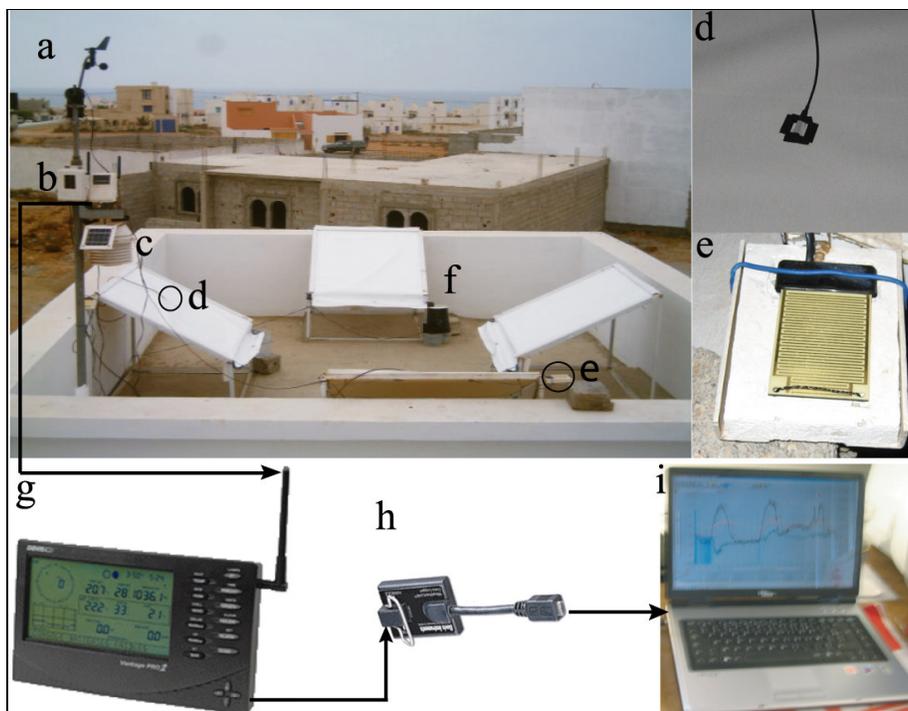


Figure III.2 : Système de mesures des variables climatiques. (a) Anémomètre à coupelle et girouette. (b) Boîte de jonction des capteurs ISS (*Integrated Sensor Suite*) et l'émetteur. (c) abri équipé d'une ventilation active pour mesurer la température ambiante et l'humidité relative. (d) Sonde à résistance thermique placée sur la surface du condenseur. (e) Capteur d'arrosage foliaire (AF). (f) Pluviomètre. (g) Console sans fil pour capter les données en provenance des capteurs. (h) Datalogger enregistreur de données. (i) PC menu d'un logiciel WeatherLink qui permet de visualiser les données en temps réel, de récupérer les données enregistrées par le Datalogger.

III.2.3.3 Interface informatique Weatherlink

Le logiciel Weatherlink permet d'exploiter très finement les données collectées par les stations météorologique Vantage Pro / Pro2 (Figure III.2.h) L'enregistreur de données fonctionne en mode connecté à un PC, il est possible de consulter en temps réel les données climatiques ou en mode non connecté, l'enregistreur collectera les données pour des intervalles de 1, 5, 10, 15, 30, 60 ou 120 minutes.

Le logiciel WatherLink permet de visualiser les données en temps réel, de récupérer les données enregistrées par le Datalogger, de produire des rapports, des graphiques et de publier sur Internet des pages HTML avec des graphiques (Figure III.2).

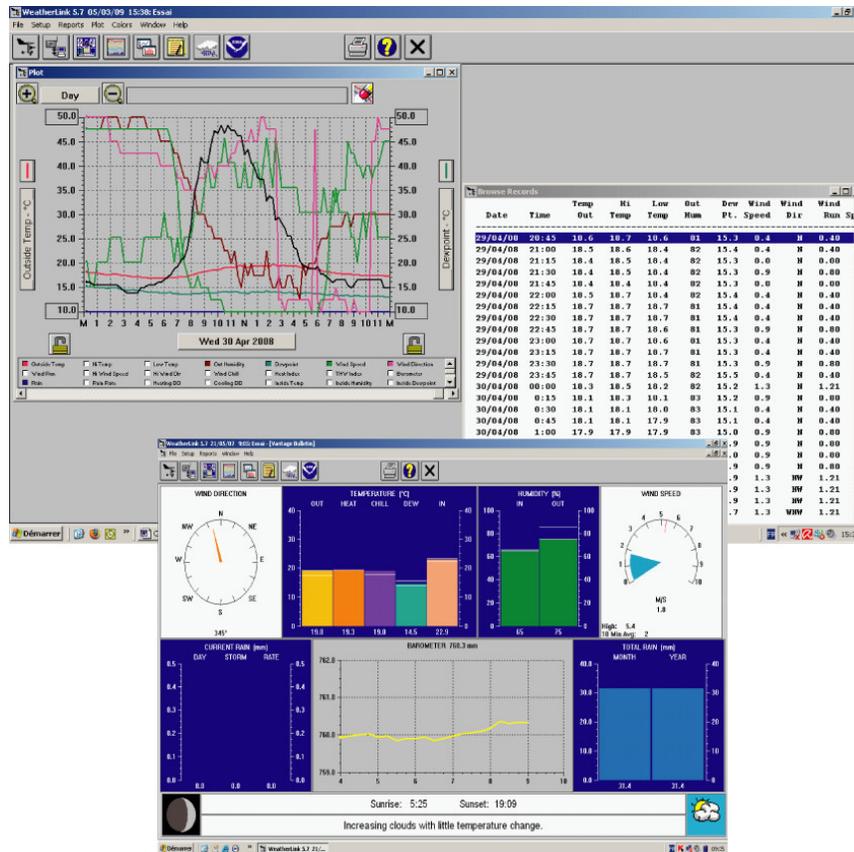


Figure III.3 : Exemple d'une base de donnée qui représente les différentes variables climatiques enregistrées par le Datalogger et visualisées au niveau du logiciel WeatherLink sous forme de graphique et de tableau.

III.3 Application de l'analyse statistique

III.3.1 Objectif et démarches

Les journées de rosée qui seront répertoriées doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Etre déterminées en fonction des différentes variables climatiques.
- Faire référence à des propriétés physiques bien définies ;
 - * Situations extrêmes (seuil maximal ou minimal pour les indicateurs).
 - * Jours disposant de caractères particuliers au niveau d'une ou de plusieurs variables. Par exemple, jour où le ciel est clair.

La fréquence des jours de rosée le long de l'année d'étude doit être prise en compte. En effet, il est utile de proposer le nombre de jours de rosée et de déterminer les jours avec des situations climatiques favorables à la condensation de la vapeur d'eau. Par exemple, en cas de

ciel clair, d'humidité relative importante et de vent faibles, on assistera à une diminution de température du condenseur et par conséquent, à une intense condensation.

La caractérisation des données climatiques a donc pour objectif la maîtrise des bases de données météorologiques, afin de disposer d'une vue à la fois synthétique et détaillée des paramètres climatiques. Elle nécessite l'établissement d'une démarche claire et rigoureuse.

L'analyse univariante intègre les études effectuées pour chaque variable séparément, telles que l'approche par lecture des histogrammes, des maximas et données moyennes. L'analyse factorielle en composantes principales permet de définir d'autres indicateurs de description à partir des données journalières, afin de cerner plus précisément les évolutions de la variable climatique et la rosée.

A ce niveau, il est possible d'étudier la fréquence de chaque classe sur l'année ou en fonction des différentes périodes de l'année. Les résultats de cette première étape peuvent être représentés sous la forme d'histogrammes établis sur l'année, ou sur les différentes saisons.

On peut définir 3 saisons principales dans la région de Mirleft :

- Une saison sèche qui contiendra les mois de mai, juin, juillet et août.
- Une saison humide qui contiendra les mois de septembre, octobre, novembre et décembre.
- Les 4 autres mois (janvier, février, mars et avril), sont des mois qui vont inclure des influences multiples et leur appartenance à l'une des deux saisons précitées dépendra des quantités de rosée collectées et des indicateurs climatiques étudiés. C'est la raison pour laquelle nous les qualifierons de mois de transition.

Nous présenterons dans le quatrième chapitre les résultats relatifs à l'analyse de la rosée et la base de données pour le site d'étude. Cette partie sera par conséquent très descriptive, puisqu'elle met en évidence de façon approfondie les caractéristiques de chaque paramètre météorologique en relation avec la formation de la rosée.

III.3.2 Analyse factorielle en composante principale

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique d'analyse des données. Elle permet, à partir d'une matrice à n échantillons (individus) et p variables, la description du nuage dans un espace à p dimensions.

Considérons un tableau de données à n échantillons et p variables. Les échantillons représentent les lignes du tableau et les variables ses colonnes. Pour faciliter la visualisation de l'ensemble de données, chaque échantillon est projetée dans un espace à n dimensions

(espace des échantillons) et chaque variable peut être projetée dans un espace à p dimensions (espace des variables) et n dimensions (espace des unités statistiques).

Ainsi, on obtient un nuage de points qu'il est impossible de visualiser. Donc pour faciliter la visualisation, on projette le nuage dans un espace à deux dimensions, déterminé à partir des axes principaux ou factoriels du nuage. Cette projection permet de minimiser l'erreur de la représentation de nuage.

Pour conserver au maximum la forme du nuage donc de son inertie par rapport au centre de gravité, on travaille sur des variables centrées, l'ACP est dite centrée. De plus, afin d'éliminer l'influence de la taille des variables (problème d'échelle) dépendant des unités choisies, on considère comme variable normalisée le rapport de chaque valeur à son écart type, on réalise ainsi une ACP centrée réduite. Les variables centrées réduites sont donc sans dimension, leurs moyennes sont égales à 0 et leurs variances égales à 1.

Une fois déterminés, les axes factoriels, le nuage est projeté dans les différents plans des facteurs principaux soit dans l'espace des variables, soit dans l'espace des unités statistiques. Dans l'espace des unités statistiques, l'ACP permettra de regrouper selon des facteurs identiques les échantillons présentant des caractères d'origine ou d'évolution similaire. L'interprétation de l'ACP consiste ensuite à déterminer les facteurs responsables (composantes principales) de la structure observée.

Le premier axe factoriel (F1) de cette représentation est tel qu'il détermine le maximum d'inertie du nuage et donc de la variance, le deuxième axe (F2) perpendiculaire au premier exprime le maximum de variance restante, le 3ème axe, toujours perpendiculaire aux deux autres, est défini par le maximum d'inertie restante ; etc.

III.3.3 Classification hiérarchique

Classifier, c'est regrouper entre eux des objets similaires selon tel ou tel critère. Les diverses techniques de classification visent toutes à répartir n individus, caractérisés par p variables X_1, X_2, \dots, X_p en un certain nombre m de sous-groupes aussi homogènes que possible.

On distingue deux grandes familles de techniques de classification :

➤ La classification non hiérarchique ou partitionnement, aboutissant à la décomposition de l'ensemble de tous les individus en m ensembles disjoints ou classes d'équivalence ; le nombre m de classes est fixé.

➤ La classification hiérarchique : pour un niveau de précision donné, deux individus peuvent être confondus dans un même groupe, alors qu'à un niveau de précision plus élevé, ils seront distingués et appartiendront à deux sous-groupes différents.

Dans le cas de nos données, les valeurs de p variables (paramètre climatiques) de n individus (jours), on a choisit d'effectuer une classification hiérarchique ascendante des individus, à partir des p facteurs obtenus à l'aide d'une ACP sur les variables précédentes.

III.4 Estimation du taux de condensation

Pour estimer le taux de condensation à partir de ces données climatiques, plusieurs méthodes ont été utilisées :

- Méthode physique
- Méthode neuronale

III.4.1 Méthode physique

La modélisation physique réalisée par l'équipe OPUR repose sur les relations thermiques et thermodynamiques utilisées pour définir les variations des caractéristiques de la condensation de l'air humide (rosée) dans son évolution temporelle (temps de condensation) ou spatiale pour différents sites de mesures.

Le taux de condensation est la quantité d'eau produite chaque jour à partir de l'humidité atmosphérique dépend des paramètres météorologiques de chaque région où T_a , T_d et RH sont bien favorables pour la condensation de la rosée [$h = f(RH, N, V, T_a, T_d)$].

III.4.2 Réseaux de neurones

III.4.2.1 Présentation de la méthode neuronale

Les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN) constituent une nouvelle approche de modélisation des systèmes complexes, particulièrement utile lorsque ces systèmes sont difficiles à modéliser à l'aide des méthodes statistiques classiques. Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle pour modéliser le fonctionnement du cerveau humain (McCulloch et Pitts, 1943) en se basant principalement sur le concept des neurones. Il s'agit d'un modèle empirique non linéaire (Fortin et al., 1997). Il se compose d'éléments de traitement interconnectés (neurones) travaillant conjointement pour résoudre un problème spécifique. R. Hecht Nielsen 1990 donne la définition suivante : un réseau de neurones est un système de calcul composé d'éléments de

traitement simples fortement interconnectés, qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe.

III.4.2.2 Connexions entre les neurones

Les réseaux de neurones sont organisés en couches ; ces couches se composent d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation. Des entrées (X_1, X_2, \dots, X_j) sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communique aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées. Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S). Les connexions entre les neurones se font par des poids (W_1, W_2, \dots, W_j) (Figure III.4).

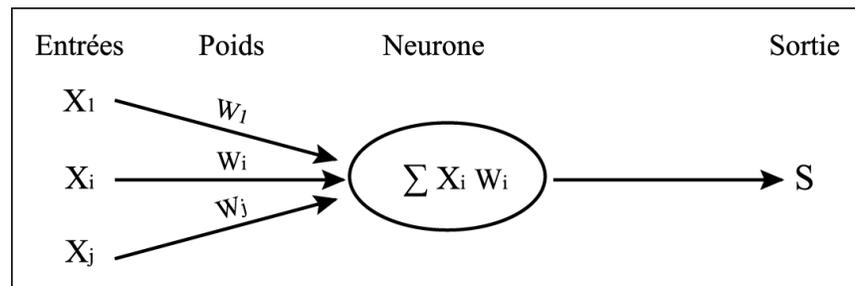


Figure III.4 : Schéma d'un neurone artificiel. Le fonctionnement d'un neurone artificiel s'inspire du fonctionnement schématisé du neurone humain.

Nous ne présentons que des aspects très généraux concernant les réseaux de neurones. Pour les détails de la méthode, le lecteur est invité à ce reporter aux références suivantes (Bishop 1995, Hinton 1992). Les réseaux de neurones à couche cachée unique est un assemblage de fonction non linéaires. Les entrées de ces fonctions sont pondérées, elles sont constituées par les variables que nous souhaitons utiliser en entrée du modèle.

Chaque neurone dispose d'une série de « liaisons synaptiques » pondérées. Les pondérations W_i sont déterminées pendant une phase d'apprentissage qui nécessite une base de données expérimentale représentant les variations de la variable à prédire en fonction des variables d'entrées. Un réseau de neurones à une couche cachée, implique qu'il soit nécessaire de déterminer les pondérations associées aux variables d'entrées, et les pondérations associées aux connexions entre neurones de la couche « cachée » et de la couche « sortie ».

Le choix du nombre de neurones de la couche de sortie est fixé par le nombre de variables à prédire. Le nombre de neurones cachés est fixé en fonction du comportement du réseau en phase d'apprentissage.

III.4.2.3 Critères de performance du modèle

La modélisation par le réseau de neurones artificiels consiste à trouver le nombre optimal de neurones dans la couche cachée ainsi que le nombre d'itérations pour aboutir au modèle le plus performant qui est déterminé par le minimum du nombre de noeuds et d'itérations. La performance du modèle de RNA est aussi validée par d'autres paramètres statistiques des phases d'apprentissage et du test et qui correspondent au nombre optimal de neurones de la couche cachée et du nombre d'itérations.

Les paramètres statistiques utilisés dans ce travail sont : l'erreur moyenne des carrés ASE (Average Squared Error) et le coefficient de détermination R^2 . Ces paramètres sont donnés par les relations suivantes :

$$ASE = \frac{\sum_{i=1}^N \left((Q_{ti} - Q'_{ti})^2 \right)}{N} \quad (III.2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{t_i} - Q'_{t_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{t_i} - \bar{Q}_{t_i})^2} \quad (III.3)$$

Q_{t_i} est la quantité de rosée calculée par le modèle, Q'_{t_i} est la quantité de rosée mesurée et N est le nombre de données de l'ensemble de calage.

La valeur de l'ASE donne une indication sur l'erreur de prévision obtenue lors de la phase de test de la modélisation et R^2 montre la variation de la valeur de la quantité de rosée calculé ou estimé par le modèle de la régression linéaire. Les valeurs idéales pour ASE sont égales à 0 et R peut correspondre à 1.

La performance du modèle est aussi déterminée graphiquement par l'alignement du nuage de points autour de la courbe $y = x$ (droite linéaire à 45°).

III.5 Simulation numérique

Le CFD (*Computational Fluid Dynamics*) est une méthode de calcul qui relie entre elles plusieurs équations de thermodynamique ou autres servant à décrire un phénomène physique complexe comme le mouvement de l'air autour du condenseur. Le but est de simuler le comportement de ce phénomène quand les principaux paramètres sont variés. Le logiciel tel *PHOENICS* est utilisé pour le traitement des influences que le vent peut générer sur la température à la surface du condenseur.

Pour la simulation de l'écoulement de l'air autour des condenseurs, nous avons utilisé le logiciel PHOENIX version 8. Il fait partie des logiciels qui traitent les écoulements bidimensionnels ou tridimensionnels de fluides. Les flux peuvent être laminaires ou turbulents, accompagné d'un transfert de chaleur à la surface des condenseurs.

III.6 Analyse physico-chimique de la rosée

L'analyse physico-chimique de la rosée nous renseigne sur la qualité de l'eau issue de la condensation de la vapeur d'eau et de l'atmosphère où elle s'est formée. La composition de cette eau est enrichie par la dissolution des gaz environnants et des petites particules qui se déposent sur la surface du condenseur (Beysens et al, 2006). La chimie de la rosée et de la pluie effectuée à Mirleft présente des résultats sur la qualité de l'eau. La comparaison entre ces deux sources nous a donné une idée sur l'influence possible du substrat de condensation et de la contribution potentielle des aérosols atmosphériques. La conductivité électrique EC et le pH ont été mesurés immédiatement à la fin de chaque prélèvement (Figure III.5). Les anions majeurs (Cl^- , NO_3^{2-} et SO_4^{2-}) et les cations majeurs (K^+ , Mg^{2+} , Na^+ et Ca^{2+}) ont été analysés par spectrométrie d'émission atomique (ICP) au Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique de Rabat (CNRST). Dans le cadre de cette étude, deux analyses biologiques de l'eau de rosée ont été effectuées le 5/10/2007 et le 11/01/2008 dans le laboratoire de microbiologie à l'université Ibno Zohr dans le but de déterminer une éventuelle contamination.



Figure III.5 : Mesures de la conductivité électrique EC (Conductimètre) et du pH (pHmètre).

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié les méthodes de collecte de la rosée et des paramètres météorologiques qui décrivent ce phénomène. Il nous est apparu nécessaire de ne pas réduire les fichiers météorologiques uniquement à une base de données se prêtant à une description des relations existant entre variables climatiques et la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Nous avons pu ainsi identifier les critères d'observation qui nous sont nécessaires pour caractériser les jours les plus favorables à la formation de la rosée grâce à des analyses statistiques de bases incluant des outils simples, directement applicables et les outils d'analyse factorielle et de classification.

Dans le but d'estimer la quantité de rosée qu'on espère avoir dans une région donnée à partir de la génération simultanée de plusieurs variables climatiques, on a utilisé des modèles qui se basent sur des méthodes linéaires et non linéaires prenant en compte les interactions entre ces différentes variables.

Dans le prochain chapitre, nous avons choisi de réduire au maximum les développements mathématiques et théoriques associés à ces outils statistiques. Il nous est apparu donc plus judicieux d'illustrer directement leurs applications grâce à des logiciels sur des fichiers météorologiques.

IV.1 Introduction

Comme nous l'avons abordé aux chapitres précédents, les techniques et les objectifs de l'analyse du phénomène de la condensation de la vapeur d'eau sont en relation avec les conditions climatiques. De nombreuses méthodes ont été utilisées pour analyser, classifier et modéliser les variables météorologiques.

La quantité de vapeur d'eau condensée sur une surface varie en fonction des effets conjoints des paramètres météorologiques RH , V_v , V_d , T_a , T_d , N et de la température T_c du condenseur (Guyot, 1999) et le fonctionnement de la machine thermique "condenseur" (CLUS, 2007). L'implication de chacune de ces variables dans le rendement ainsi que leur dépendance entre elles, est complexe et les corrélations expérimentales sont utiles pour la compréhension des phénomènes.

Afin d'examiner ces combinaisons climatiques, la démarche généralement utilisée est de représenter dans un premier temps les évolutions climatiques par des données journalières (moyennes, maxima et minima) et déterminer les seuils ayant une signification par rapport à la formation de la rosée. Les influences de chaque paramètre sur la condensation atmosphérique ont ensuite été déterminées.

Dans le but d'élaborer une méthode plus simple à la caractérisation de cet environnement climatique, notre démarche a mené à la création des journées types par classification statistique. Dans son travail sur le climat Alpin, Chaix (Chaix, 2002) a exposé une méthode de classification utilisant les variables réduites de l'analyse en composantes principales, appliquée à chaque paramètre météorologique.

La caractérisation du climat de la région repose sur l'analyse expérimentale des bases de données météorologiques, l'utilisation d'outils statistiques et l'analyse des différentes relations entre la formation de la rosée et les variables climatiques précèdent toute recherche de jours types dont les rendements prennent des valeurs importantes.

De multiples outils ont été utilisés pour la modélisation de ce phénomène météorologique, et pour l'élaboration d'une équation d'estimation de la rosée à partir de simple donnée climatique qu'on peut collecter à travers les sites Internet. Deux approches sont alors utilisées :

➤ l'analyse statistique de base incluant les outils simples, directement applicables, et les outils d'analyse factorielle, de comparaison des distributions, de régression et de classification.

- la modélisation des variables climatiques en se basant sur une méthode physique (OPUR) et une autre approche basée sur les réseaux de neurone.
- la simulation numérique des cas concernant les conditions aérauliques autour du condenseur et le phénomène de la condensation sur la surface d'une plaque plane.

IV.2 Présentation de la région d'étude

Suite à de nombreuses reconnaissances sur le terrain, le choix définitif du site d'étude s'est porté sur le site de Mirleft, dans le Sud Ouest du Maroc. Situé à 140 kilomètres au sud d'Agadir (Figure IV.1), les coordonnées géographiques du site sont 29° 35' 17" Nord, 10° 02' 20" Ouest, avec une altitude de 43 mètres au dessus du niveau de la mer.

Le site de Mirleft a été retenu car il s'agissait d'un site rural répondant aux différents critères de sélection définis au démarrage de l'étude, à savoir :

- * la présence en quantité suffisante d'humidité relative durant toute l'année.
- * l'absence de sources locales de pollution directe, le site de Mirleft se trouve à des distances supérieures à 140 km des agglomérations possédant des activités industrielles notables. Les installations les plus proches sont localisées à Agadir.
- * l'aide présentée par les autorités de Mirleft on mettant à notre disposition un local pour installer nos expérimentations.
- * l'aide présentée par la population locale à travers l'association d'Imargane qui nous a permis de mettre en place une station de collecte de rosée et du brouillard dans le village d'Idouasskssou à 7 km à l'Est de Mirleft.

Dans le but de déterminer d'autres endroits prometteurs à la collecte de la rosée, un deuxième site a été exploité à l'est de Mirleft. On a pu installer un condenseur de 2 m² et un filet à brouillard d'1 m² sur le toit d'une école (Figure IV.2) afin de mesurer les contributions relatives rosée-brouillard sur le condenseur et comparer les deux contributions.

Le climat de la région est aride à nuances océaniques, les étés sont secs et les hivers sont humides. Les températures sont douces et sans excessivité grâce à la disposition littorale. Les précipitations annuelles sont médiocres (de l'ordre de 50 mm).

Durant cette année d'étude, on a constaté que l'hiver peut comporter de longues périodes de sécheresse, l'été des phases de pluie et de vent, et aussi de redoutables vagues de chaleur. Si l'on ajoute à cela les grandes écarts pluviométriques en années successives dans le bassin hydrologique de Souss-Massa et le caractère souvent brutal et intense des précipitations, on aboutit finalement à un schéma heurté qui caractérise la région aride. Ces dernières altérations s'expliquent aisément ; la saison sèche estivale résulte de l'immunité

anticyclonique subtropicale et de l'intervention alizéenne océanique. C'est dans ce contexte que l'alizé peut céder la place à des irrptions pluvieuses d'air polaire maritime ou d'air tropical humide et que les vagues de chaleur d'origine saharienne sont susceptibles d'intervenir. Les pluies d'hiver découlent pour leur part essentiellement des advections d'air polaire maritime et des poussées froides d'altitude modelées dans les ondes des courants d'Ouest.

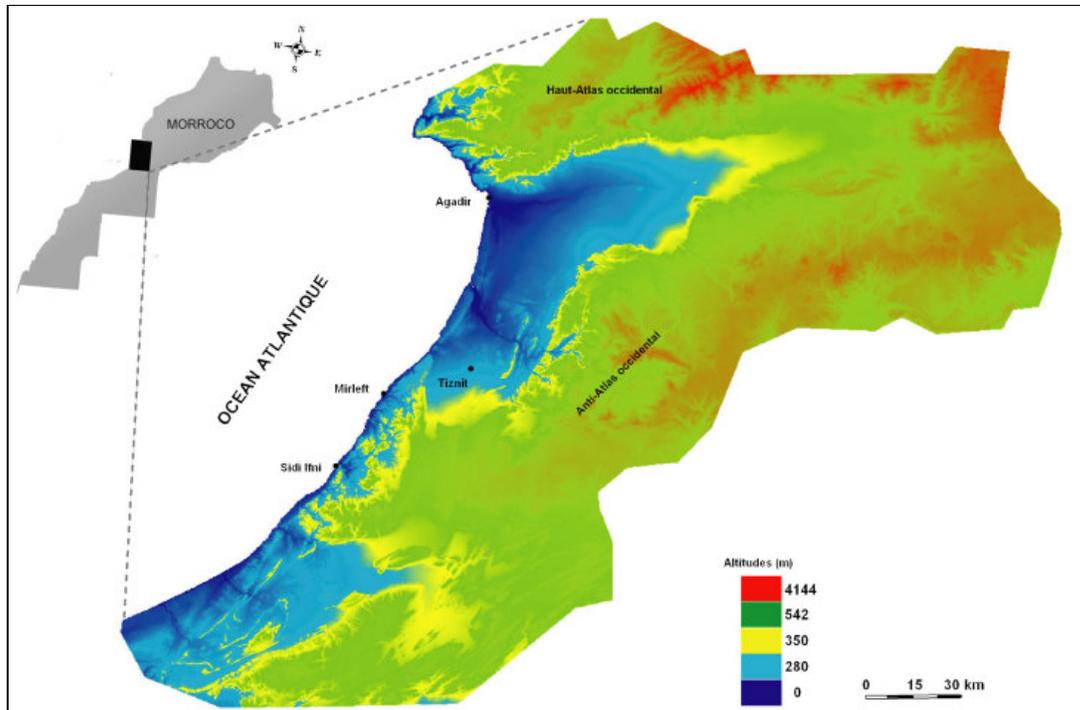


Figure IV.1 : Situation géographique de la région d'étude dans le bassin hydrologique de Sous-Massa représenté par le modèle numérique de terrain.



Figure IV.2 : Filet à brouillard de 1 m² et condenseur orienté W installés sur le toit d'une école à Idouasskssou grâce au concours d'OPUR et des élèves-ingénieurs de l'Ecole des Mines de Douai. (Coordonnées : 29° 34' 03" N, 9° 59' 51" W, altitude 240 m à l'est de Mirleft).

Avec un pas de temps de 15 minutes, la station météorologique enregistre un ensemble de données ; direction et vitesse du vent, précipitation, pression, humidité, point de rosée et température. Les valeurs de température relevées par le capteur sur le site de Mirleft sont présentées graphiquement ci-dessous. Durant la période étudiée (du 01-05-2007 au 30-04-2008), la distribution des températures est caractérisée par un maximum de 36,7 °C observé sur la fin juillet et un minimum de 10,9 °C à la fin de décembre (Figure IV.3). La valeur de température moyenne est de 19,36 °C ($\pm 3,12$). Les valeurs pluviométriques sont présentées dans la Figure IV.4 sous la forme de précipitations cumulées. La courbe des précipitations cumulées permet de mettre en évidence, les périodes sèches (tracé horizontal) et les épisodes pluvieux (tracé vertical). Le découpage saisonnier des valeurs de flux de précipitation (Tableau IV.1) ne permet pas de pointer de réelle différence entre les saisons. De même, le nombre de jours pluvieux n'affiche pas de différences saisonnières marquées. L'année étudiée semble donc être plus sèche avec une valeur annuelle de 48,65 mm.

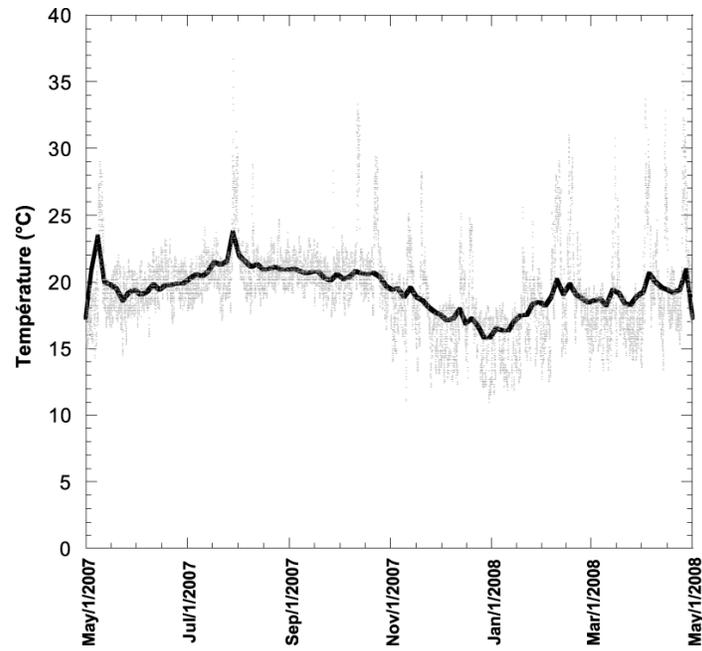


Figure IV.3 : Températures (°C) relevées tous les quarts heures sur le site de Mirleft.

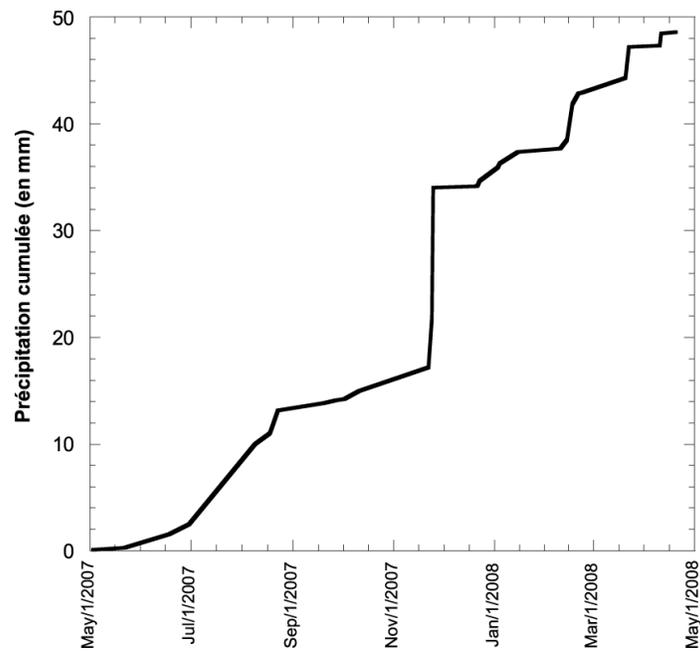


Figure IV.4 : Relevé des précipitations cumulées (mm) sur le site de Mirleft entre le 01-05-2007 et le 30-04-2008.

Tableau IV.1 : Comparaison des valeurs saisonnières de précipitations (mm) et du nombre de jours pluvieux ; automne (21/09/07 au 21/12/07), hiver (22/12/07 au 21/03/08), printemps (01/05/07 au 20/06/07 et 22/03/08 au 30/04/2008), été (21/06/07 au 20/09/07).

	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Précipitation (mm)	20,29	10,19	5,86	12,31
Nombre de jours	7	11	7	6

IV.3. Caractérisation des données climatiques

Dans cette partie, nous présentons les résultats relatifs à l'analyse de la base de données pour le site de Mirleft pour la période allant du 01/05/2007 au 30/04/2008. Cette analyse sera par conséquent très descriptive, puisqu'elle met en évidence de façon approfondie les caractéristiques de chaque paramètre météorologique. Les résultats de cette première étape peuvent être représentés sous la forme d'histogrammes établis sur l'année, ou sous les différentes saisons.

On peut alors définir 3 saisons principales sur Mirleft selon la quantité de rosée collectée :

- Une saison sèche qui contiendra les mois de Mai à Août.
- Une saison humide qui contiendra les mois de Septembre à Décembre.
- Les 4 autres mois (Janvier, Février, Mars et Avril) présentent des influences multiples. C'est la raison pour laquelle nous les qualifierons de mois de transition.

IV.3.1 La température ambiante (T_a) et de rosée (T_d)

On observe que la température ambiante évolue d'une manière distincte d'une saison à l'autre. La moyenne journalière est de 20,2 °C ($\pm 1,77$) en saison sèche, 19,2 °C ($\pm 2,72$) en saison humide et de 18,7 °C ($\pm 3,19$) en saison de transition. Les amplitudes thermiques sont relativement faibles (5° en moyenne), ceci étant dû principalement à l'influence océanique. On constate une augmentation en moyenne de 1 °C de l'amplitude thermique pour la saison de transition (Tableau IV.2). Les évolutions journalières de la température peuvent être caractérisées par l'amplitude diurne (7 h à 19 h 45 min) qui est une indication de la quantité d'ensoleillement reçu, et de l'amplitude nocturne (20 h à 6 h 45 min) qui est, elle, mise en relation avec la couverture nuageuse nocturne. Ainsi, les minima observés pour l'amplitude thermique se retrouvent en saison sèche, en cas de forte humidité. L'amplitude maximale de 16,8 °C en saison de transition à une situation spécifique ; le passage d'un vent chaud

saharien de Sud-Est (Chirgué) a provoqué un effet d'assèchement entraînant ainsi une température maximale de 36,3 °C. Les amplitudes diurnes et nocturnes sont minimales en saison sèche et ont tendance à évoluer en saison humide et de transition.

Dans la figure IV.5, l'évolution de la température ambiante est distincte d'une saison à l'autre. Dans la saison sèche 78,9 % des jours (97 jours) ont une température qui dépasse 19 °C, par contre ce pourcentage diminue en saison humide (57,5 %) et en saison de transition (31,7 %).

Pour la température de rosée, elle évolue différemment d'une saison à l'autre. On constate que des températures ambiantes importantes engendrent une élévation de la température de rosée (Figure IV.5). La différence nocturne entre ces deux températures donne une idée sur l'état de l'air (humide ou non humide). Les épisodes de forte humidité relative RH correspondent aux événements où la différence entre T_a et T_d tend vers 0 °C.

Tableau IV.2 : Comparaison de la température (°C) dans les trois saisons de l'année.

Ta (en °C)	Journalière	Max-J	Min-J	Amp*. Diurne	Amp*. Nocturne	Amp*. Jour
Saison sèche						
Moyenne	20,2	22,6	18,3	3,9	2,2	4,3
Maximum	26,9	36,7	23,8	15,1	12,4	15,9
Minimum	16,6	18,3	14,1	1,8	0,5	2,0
Ecart-type	1,8	2,9	1,7	1,8	1,7	2,2
Saison humide						
Moyenne	19,2	21,6	16,8	4,3	2,8	4,8
Maximum	29,0	35,9	24,7	15,8	11,4	16,5
Minimum	14,1	16,9	10,9	1,2	0,5	2,2
Ecart-type	2,7	3,2	2,9	1,8	1,5	2,1
Saison de transition						
Moyenne	18,7	21,7	15,8	5,1	3,2	5,8
Maximum	29,5	36,3	25,4	13,8	7,9	16,8
Minimum	14,4	17,2	11,2	1,6	0,6	2,3
Ecart-type	3,2	4,3	2,9	2,2	1,5	2,7

*Amplitude moyenne sur chaque jour de la saison

Max-J : Maximum journalier

Min-J : Minimum journalier

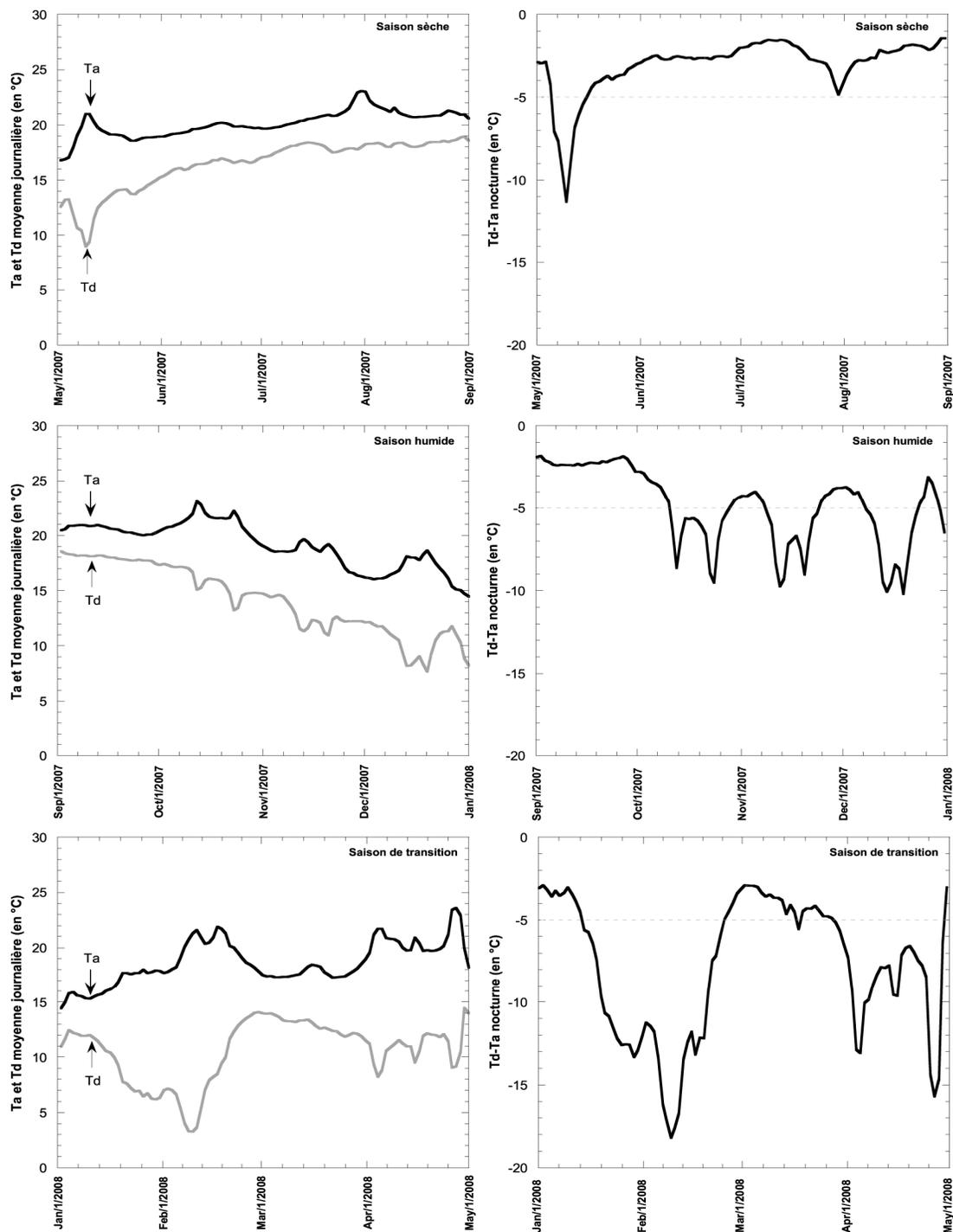


Figure IV.5 : Présentation de l'évolution de la température ambiante et de la température de rosée moyenne journalière durant les trois saisons d'étude (sèche, humide et de transition). Les événements où $Ta - Td < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sont fréquents sur la saison sèche et humide.

IV.3.2 Humidité relative (RH)

D'après l'analyse des données à notre disposition, on a constaté que l'humidité relative moyenne (journalière) est élevée en saison sèche avec 80,6% ($\pm 12,45\%$) pour diminuer sensiblement de 5% en saison humide et de 15% en saison qualifiée de transition. Le tableau IV.4 expose les principales statistiques de la moyenne journalière, de la moyenne diurne et nocturne, des maxima et des minima.

Tableau IV.3 : Description de l'humidité relative (en %) durant les trois saisons d'étude.

RH (en %)	Journalière	Max-J	Min-J	Diurne	Nocturne
Saison sèche					
Moyenne	80,6	88,7	69,6	77,9	83,6
Maximum	92,3	98	87	91	96,8
Minimum	17,8	30	10	17,6	18,7
Ecart-type	11,1	8,1	14,1	11,5	11,2
Saison humide					
Moyenne	75,8	86	63,7	75,7	76,7
Maximum	94,3	97	87	92,4	96,4
Minimum	24,2	45	13	21,2	20,9
Ecart-type	16,5	9,9	20,6	15,7	18,7
Saison de transition					
Moyenne	65	78,2	50	65,2	65,9
Maximum	86,7	93	80	89,7	89,8
Minimum	14,5	24	9	12,6	14
Ecart-type	20,25	15,5	23,2	19,2	23

Max-J : Maximum journalier

Min-J : Minimum journalier

On observe dans la figure IV.6 que la distribution de l'humidité relative est différente durant l'année d'étude. Pendant la saison sèche, le nombre de jours dont l'humidité est supérieure à 75% est 105 (84 % des jours), par contre dans la saison humide, il est de 94 (78 % des jours) et il diminue à 53 (44 % des jours de la saison) durant la saison de transition.

En général, on constate que les jours les plus humides durant la période d'étude présente 69 % des jours de l'année. Ceci peut être expliqué par la proximité de la station de mesures avec l'Océan Atlantique. Le faible pourcentage de l'humidité durant la saison de transition est probablement dû aux influences des vents chauds provenant du Sahara marocain.

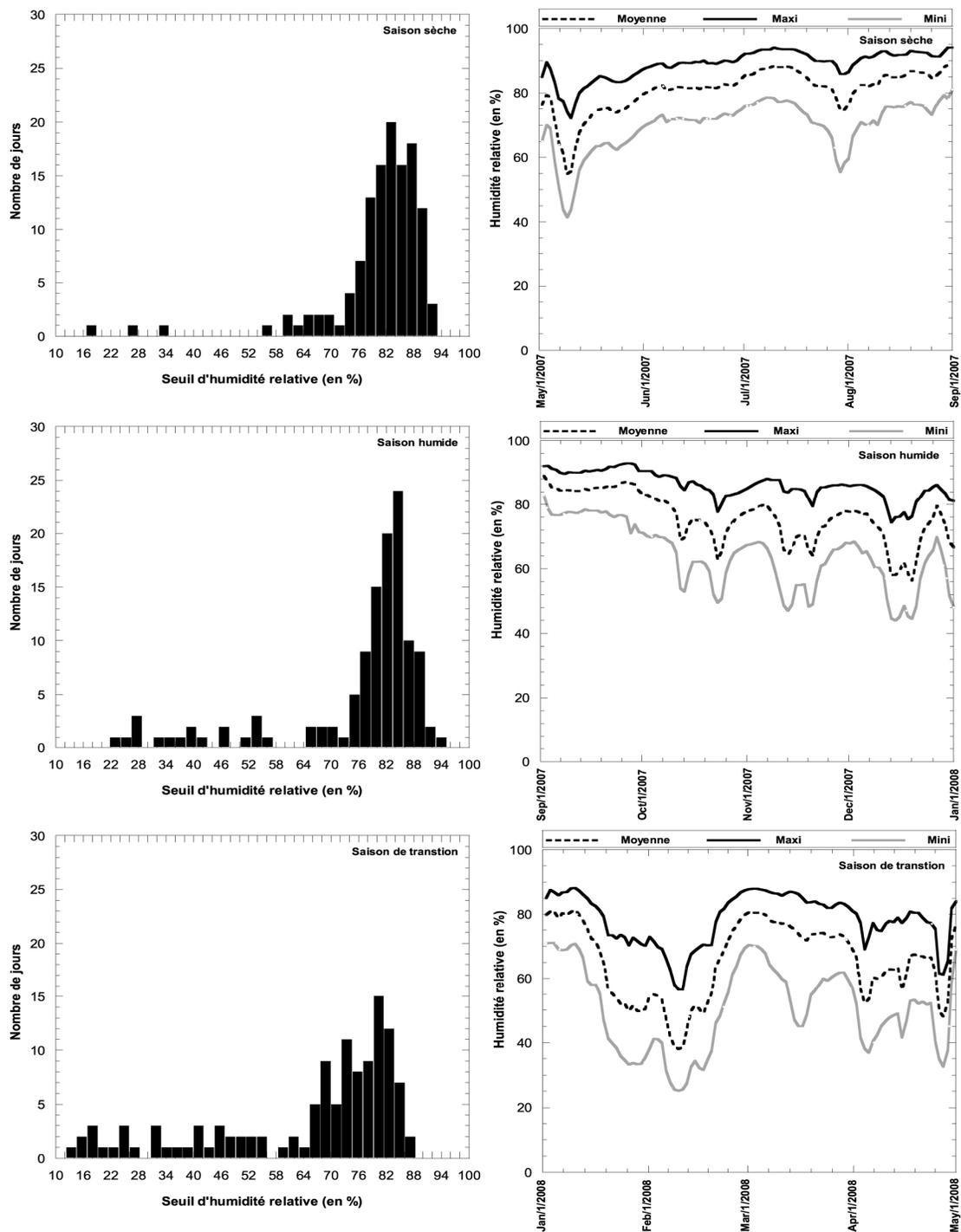


Figure IV.6 : Présentation de la distribution et de l'évolution de l'humidité relative moyenne journalière durant les trois saisons d'étude (sèche, humide et de transition).

IV.3.3 La vitesse et la direction du vent (V)

Dans notre étude, on s'est intéressé à trois paramètres pour caractériser la vitesse et la direction du vent :

- La moyenne journalière
- La moyenne diurne (7 h à 19 h 45 min)
- La moyenne nocturne (20 h à 6 h 45 min)

En moyenne, durant la période d'étude, la vitesse du vent journalière enregistrée à la station de Mirleft ne dépasse pas 2,4 m/s. On remarque que le vent est faible pendant la nuit sur toute la période d'étude avec une moyenne de 2,2 m/s. En saison humide, la vitesse du vent (1,9 m/s) est généralement inférieure à celle de la saison sèche (2,3 m/s) et de la saison de transition (2,4 m/s) (Tableau IV.5).

Les figures IV.7 et IV.8 illustrent bien le caractère saisonnier de la fréquence des vitesses et des directions des vents à prédominance des alizés pendant la majeure partie de l'année avec une élévation de l'intensité pendant les mois de février et de décembre. En effet, les roses de vent réalisées d'après les données mettent en évidence une nette variation de la direction du vent au cours de la journée dans toutes les saisons. Ce changement de direction du vent est accompagné par une augmentation de la vitesse du vent. En moyenne, les vitesses des vents enregistrées respectivement dans les saisons sèche, humide et de transition sont de 2,6 m/s ($\pm 0,58$), 2,2 m/s ($\pm 1,46$) et 2,7 m/s ($\pm 1,52$) durant le jour et de 2,3 m/s (± 1), 1,9 m/s ($\pm 1,31$) et 2,4 m/s ($\pm 1,71$) la nuit. Une telle variation de la direction et de la vitesse du vent au cours de la journée est typique des circulations de brises de mer et de terre. En effet, en journée, le vent prend une direction variable correspondant à un régime de vent bien défini avec une direction comprise entre 180° et 360° (brise de mer et alizé). Durant la nuit, on a presque la même situation avec l'apparition de vent qui s'oriente de la terre vers la mer, ce qui correspond à une direction de 90° à 180° (brise de terre). Un tel phénomène a été observé par Guyot sur les côtes du sud du Maroc ou en Amérique sur la côte californienne et les côtes du Pérou et du Chili (Guyot, 1999). En général, dans la région de Mirleft où la côte est orientée [180° - 360°], le vent évolue ainsi d'une direction comprise entre le Nord-Ouest et le Sud-Ouest à une direction comprise entre le Sud-Est et l'Est-Nord-Est en se renforçant.

Tableau IV.4 : Comparaison de la vitesse du vent (en m/s) dans les trois saisons de l'année.

Vitesse du vent (m/s)	Journalière	Max-J	Min-J	Diurne	Nocturne
Saison sèche					
Moyenne	2,47	4,98	0,46	2,65	2,25
Maximum	4,67	12,75	3,07	5,24	5,65
Minimum	1,32	2,51	0	1,57	0,49
Ecart-type	0,64	1,41	0,51	0,58	1,0
Saison humide					
Moyenne	2,08	4,49	0,16	2,19	1,93
Maximum	10,97	15,83	2,51	11,85	12,13
Minimum	0,76	2,51	0	0,99	0,44
Ecart-type	1,27	2,04	0,41	1,46	1,31
Saison de transition					
Moyenne	2,58	5,26	0,33	2,68	2,43
Maximum	10,14	15,26	6,15	10,32	10,90
Minimum	1,08	2,51	0	1,14	0,38
Ecart-type	1,49	2,65	0,77	1,52	1,71

Max-J : Maximum journalier

Min-J : Minimum journalier

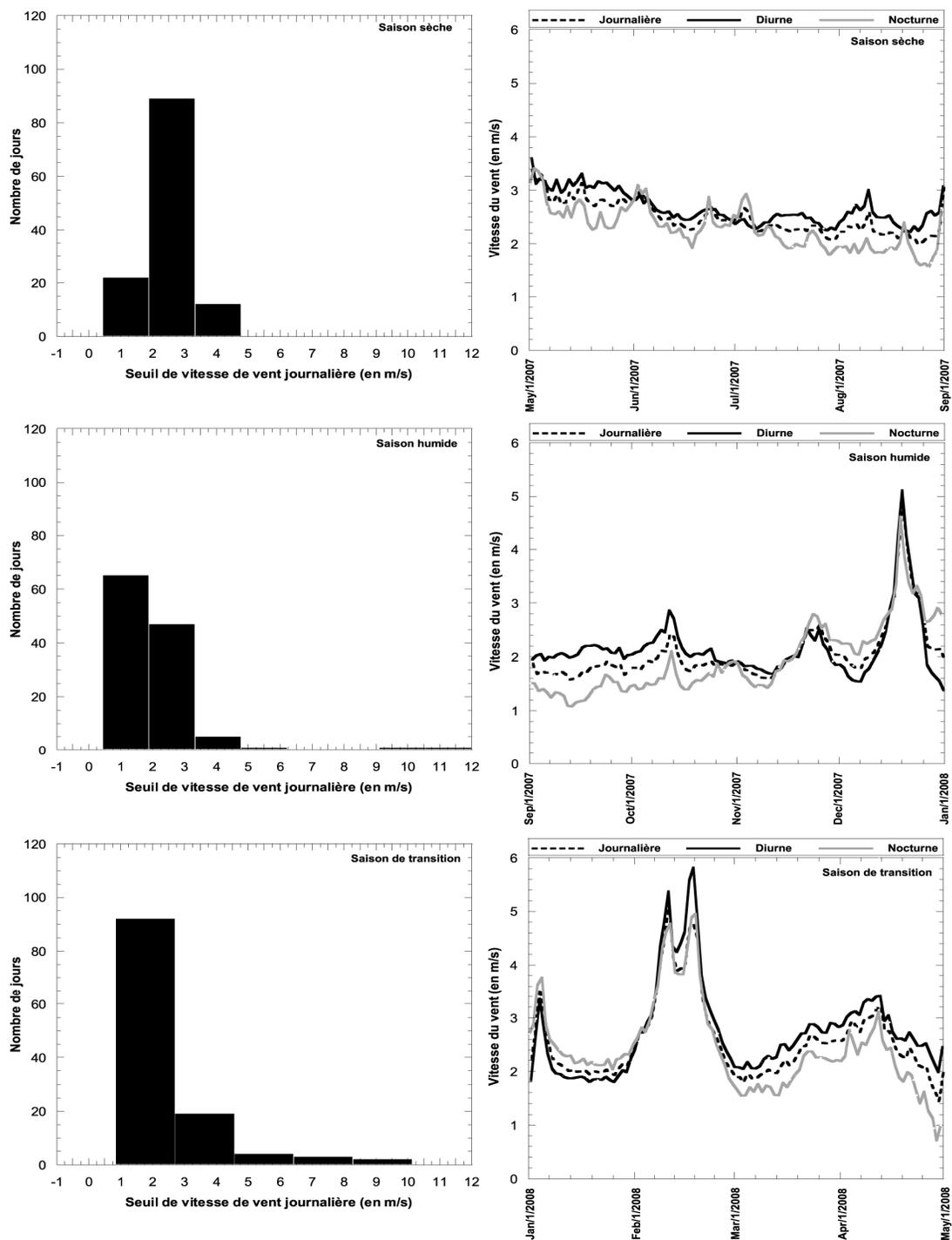


Figure IV.7 : Présentation de la distribution et de l'évolution de la vitesse du vent moyenne journalière, diurne et nocturne durant les trois saisons d'étude (sèche, humide et de transition).

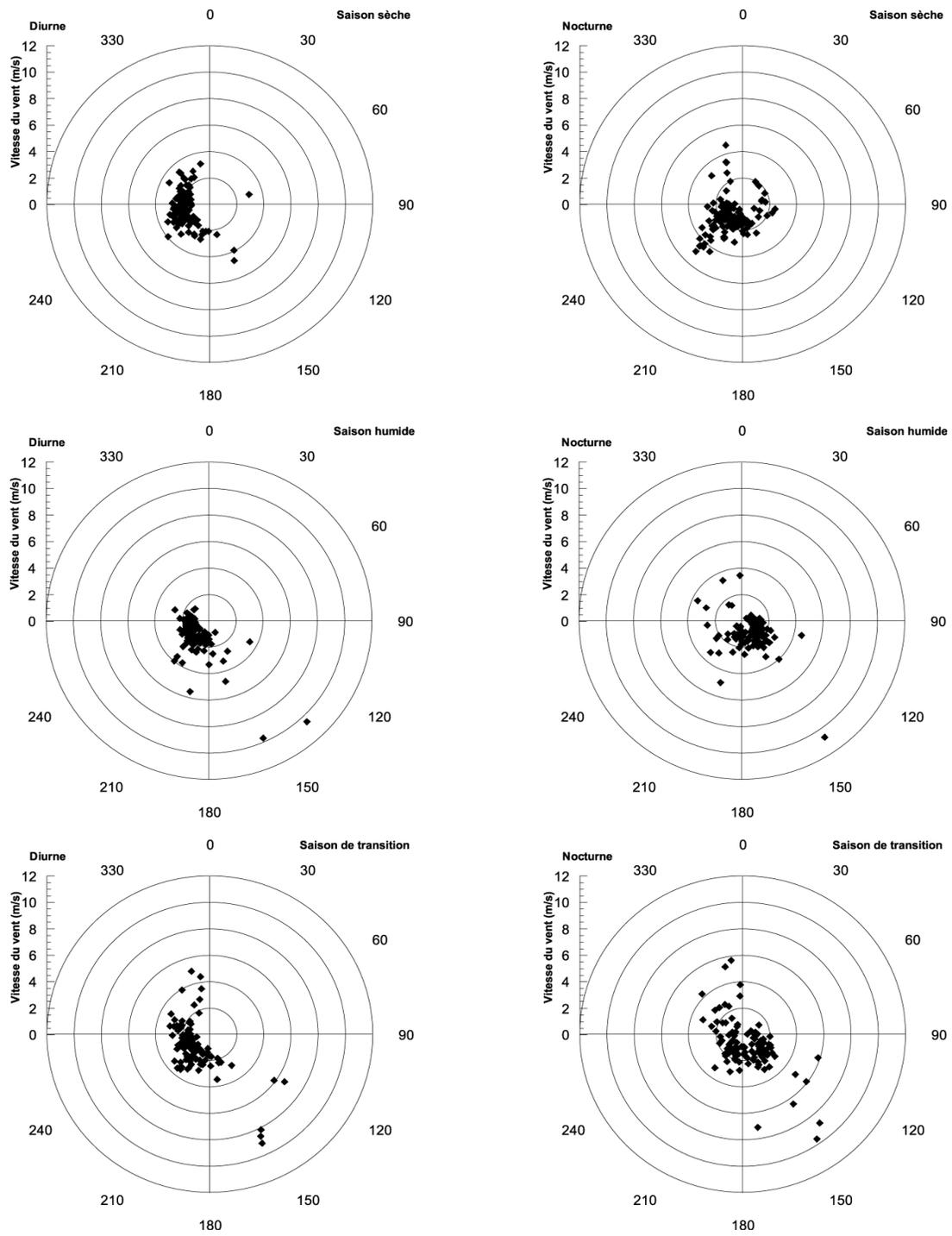


Figure IV.8 : Rose des vents diurnes et nocturnes durant les trois saisons d'étude.

IV.3.4 La nébulosité (N)

La nébulosité indique la présence ou non de nuages. Lors des relevés, l'état du ciel est codé de 0 à 8, selon la couverture nuageuse présente. Des dénominations courantes de valeurs ou d'intervalles de valeurs de la nébulosité totale sont associées à la description de l'état du ciel. Selon les critères les plus fréquemment adoptés, quatre types de ciel peuvent de ce point de vue être distingués en priorité :

- le ciel clair est entièrement ou presque entièrement dégagé de nuages, l'estimation de sa nébulosité étant 0 octas ($N = 0$).
- le ciel peu nuageux, que l'on juge largement dégagé malgré la présence effective de nuages, l'estimation de sa nébulosité se situant entre 1 et 3 octas.
- le ciel assez nuageux, que les nuages recouvrent pour moitié, si ce n'est davantage, l'estimation de sa nébulosité allant de 4 à 5 octas.
- le ciel très nuageux, qui est recouvert en grande majorité de nuages, l'estimation de sa nébulosité allant de 6 à 8 octas.

L'ensemble des observations est représenté à la figure IV.9 où sont portées la distribution et l'évolution des observations de N . Les données collectées sur le site montre sa variation le long de l'année. La distribution des valeurs de nébulosité moyenne montre une représentation importante des nuits de nébulosité supérieure à 3 dans la saison sèche (58,5% des jours) et des nébulosités inférieures à ce nombre dans les autres saisons, avec 39,1% des jours de la saison humide et 45,8% durant la saison de transition. Le ciel clair et avec peu de nuages représente durant les trois saisons respectivement, 41,5%, 60,8% et 54,2%.

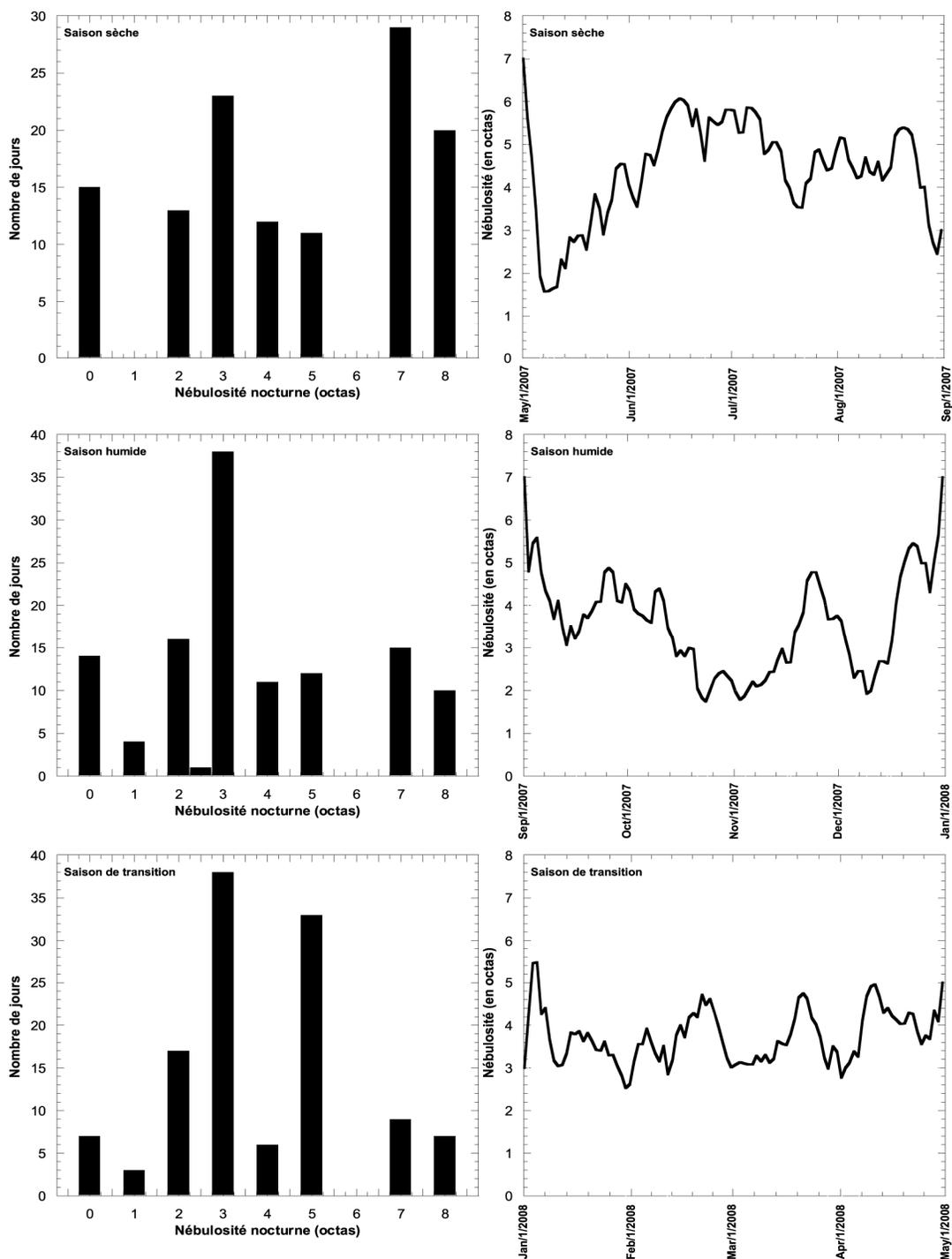


Figure IV.9 : Nombre de jours de nébulosité nocturne et son évolution durant notre année d'étude. Dans la saison humide et de transition, la nébulosité moyenne a tendance à être faible (< 4 octas), par contre dans la saison sèche, elle est importante (> 4 octas).

IV.4 Les événements de rosée, de brouillard et de pluie

IV.4.1 Rosée, brouillard et pluie à Mirleft

Durant cette année d'étude de Mai 2007 à Avril 2008, on a enregistré 178 événements de rosée et 31 épisodes de pluie (Figure IV.10). La somme des rendements de rosée de toutes les nuits pour les 4 condenseurs orientés vers le Sud (CS), le Nord (CN), l'Ouest (CW) et l'Est (CE) sont respectivement 18250 ml (18,25 mm), 18850 ml (18,85 mm), 17730 ml (17,73 mm) et 18270 ml (18,27 mm) (Figure IV.11). La quantité de pluie durant la même période est de 48.65 mm. On remarque d'après ces chiffres que les rendements de rosée durant cette d'étude représentent 40% de l'apport annuel en pluie et apparaît donc une composante importante de l'apport hydrique total (Figure IV.12).

Pour le brouillard, 20 événements ont été observés durant cette période d'étude, avec 7 évènements significatifs donnant 1410 ml (1.41 mm). Le peu d'eau récoltée au niveau du filet s'explique par le fait que la station se trouve proche de l'océan à faible altitude et que l'air atteint rarement le point de rosée. A plus haute altitude, dans les terres, l'air est plus froid et le brouillard se forme plus fréquemment (les rendements à Id-Ouasskssou, discutés plus bas, le montrent). La variation du rendement en rosée observée pour différentes directions dépend du bilan radiatif, de la direction et de la vitesse du vent.

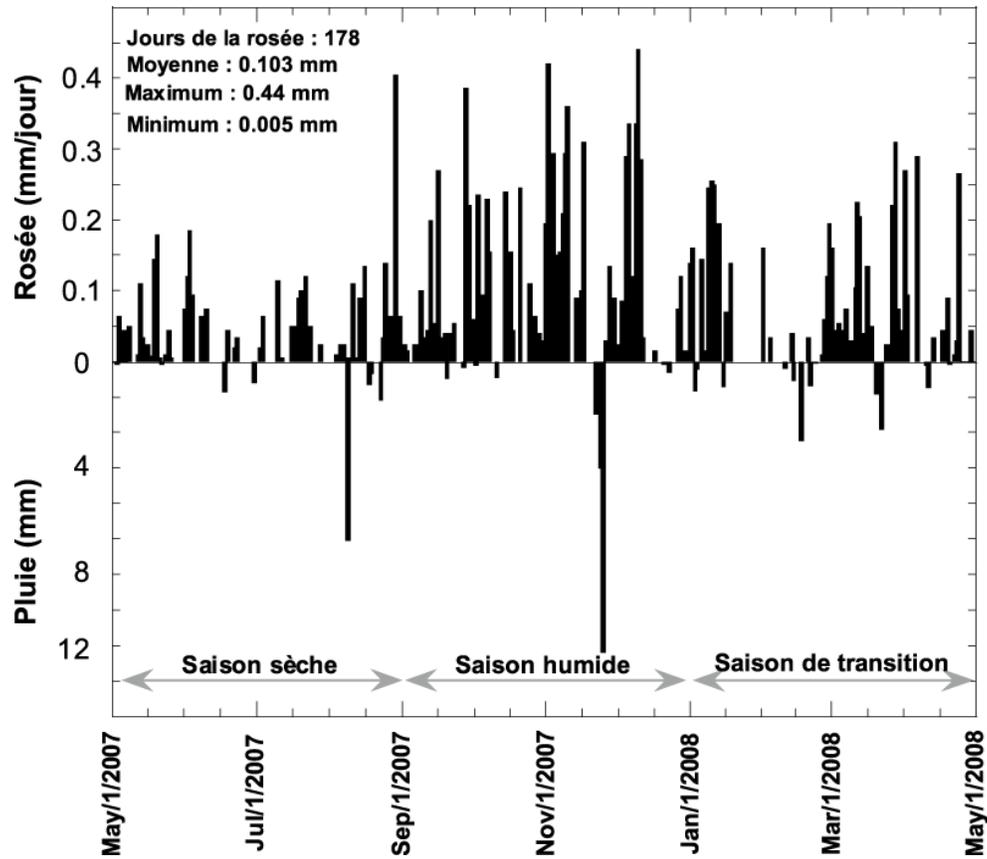


Figure IV.10 : Les événements de rosée et de pluie pendant une année d'étude, depuis le 01/05/2007 jusqu'au le 30/04/2008. Division de l'année d'étude en trois saisons avec des rendements variables de rosée.

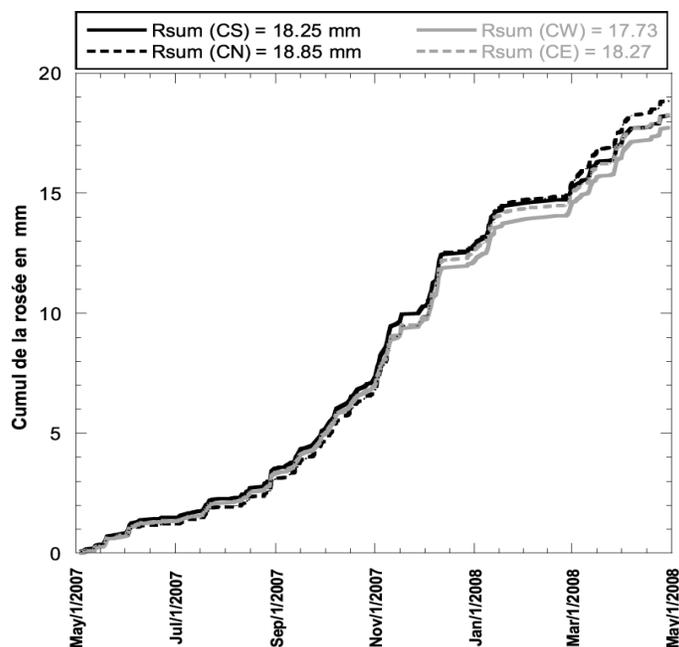


Figure IV.11 : Comparaison entre le cumul de rosée des 4 condenseurs.

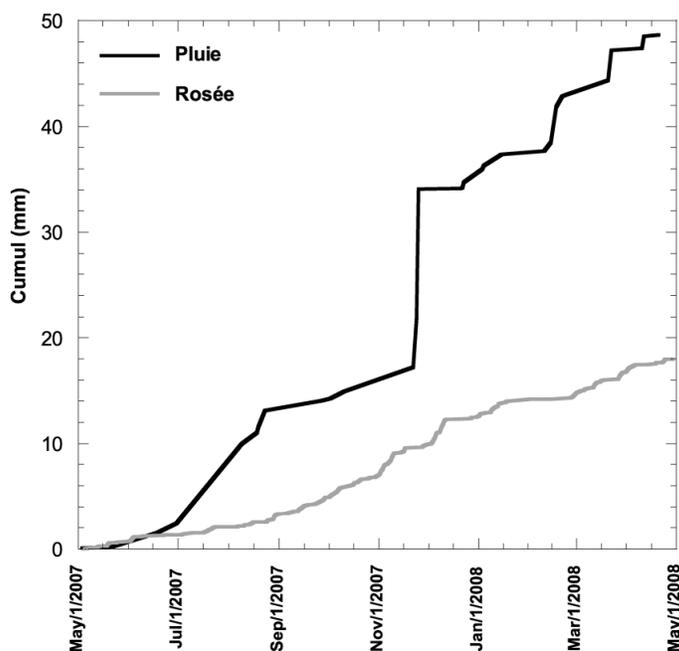


Figure IV.12 : Comparaison entre le cumul de rosée et de pluie. Le rendement de la rosée représente 40% de l'apport annuel en pluie.

IV.4.2 Rosée et brouillard à Idouasskssou

Ce village a connu 50 événements de rosée avec un rendement de 7075 ml, soit 7.075 mm (55% des jours), 5 épisodes de pluie (16 mm) et 16 jours de brouillard (6500 ml, soit 6.5 mm) durant les mois de juillet, à septembre (Figure IV.13). Après l'orage du 9/08 où le vent a dépassé 10 m/s, le condenseur a été endommagé, ce qui a causé la perte des données sur une semaine (10/08 - 17/08). Quelques jours de collecte durant le mois septembre ont également été perdus pour des raisons techniques.

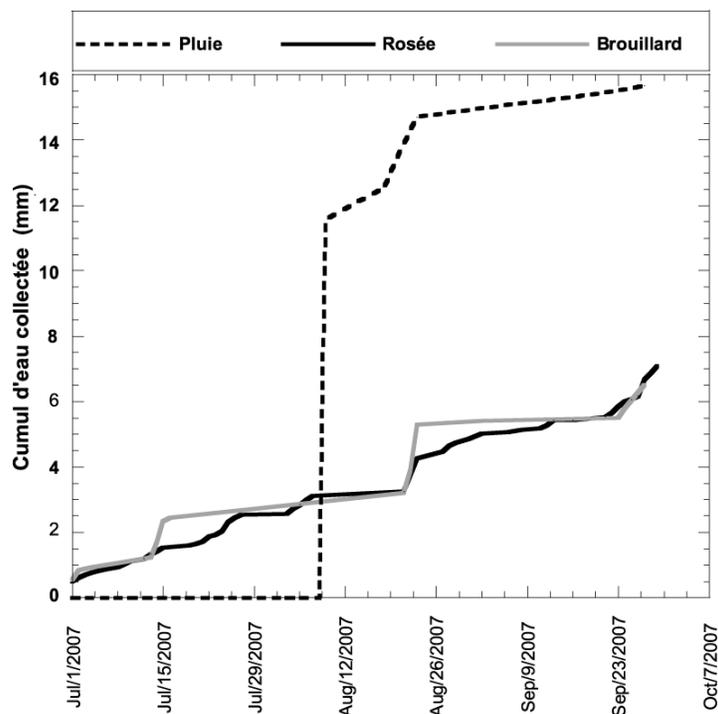


Figure IV.13 : Comparaison entre le condenseur et le filet à brouillard durant les mois de juillet, août et septembre. Le cumul de la rosée du condenseur contient aussi l'eau issue du brouillard.

IV.5 Paramètres entrant en jeu dans le phénomène de rosée

La formation de la rosée est influencée par les paramètres météorologiques et aussi l'architecture du condenseur adaptée aux caractéristiques climatiques de chaque région (Muselli et al., 2002, 2006; Beysens et al., 2003, 2005, 2006; Jacobs et al., 2004).

Le taux de condensation de l'humidité atmosphérique dépend de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, c'est-à-dire de l'humidité relative RH (%), qui est aussi fonction de la différence entre la température du point de rosée T_d (°C) et la température ambiante T_a (°C). La formation des gouttes d'eau sur la surface du condenseur se réalise quand la température de celle-ci (T_c (°C)) est inférieure à T_d . Les observations des données dont on dispose montrent aussi l'influence des autres paramètres tels que la couverture nuageuse (N en octas), qui limite la puissance radiative de refroidissement et la vitesse du vent (V en m/s), qui détermine le réchauffement convectif du condenseur, et sa direction.

La Figure IV.14 représente l'enregistrement d'une nuit de rosée (28-29/9/2007). Elle montre la période de condensation dt (pour $T_c < T_d$) indiquée par la flèche noire et les différents paramètres influençant sur la formation de rosée. Au niveau du profil de la condensation, on remarque un premier pic vers 23h15 correspondant au volume cumulé depuis 18h et retenus sous forme des gouttelettes d'eau sur la surface du condenseur. L'écoulement gravitaire diminue entre 00h45 à 04h30 suite à une élévation de la vitesse du vent. L'accentuation du pic à 06h30 est due au raclage manuel.

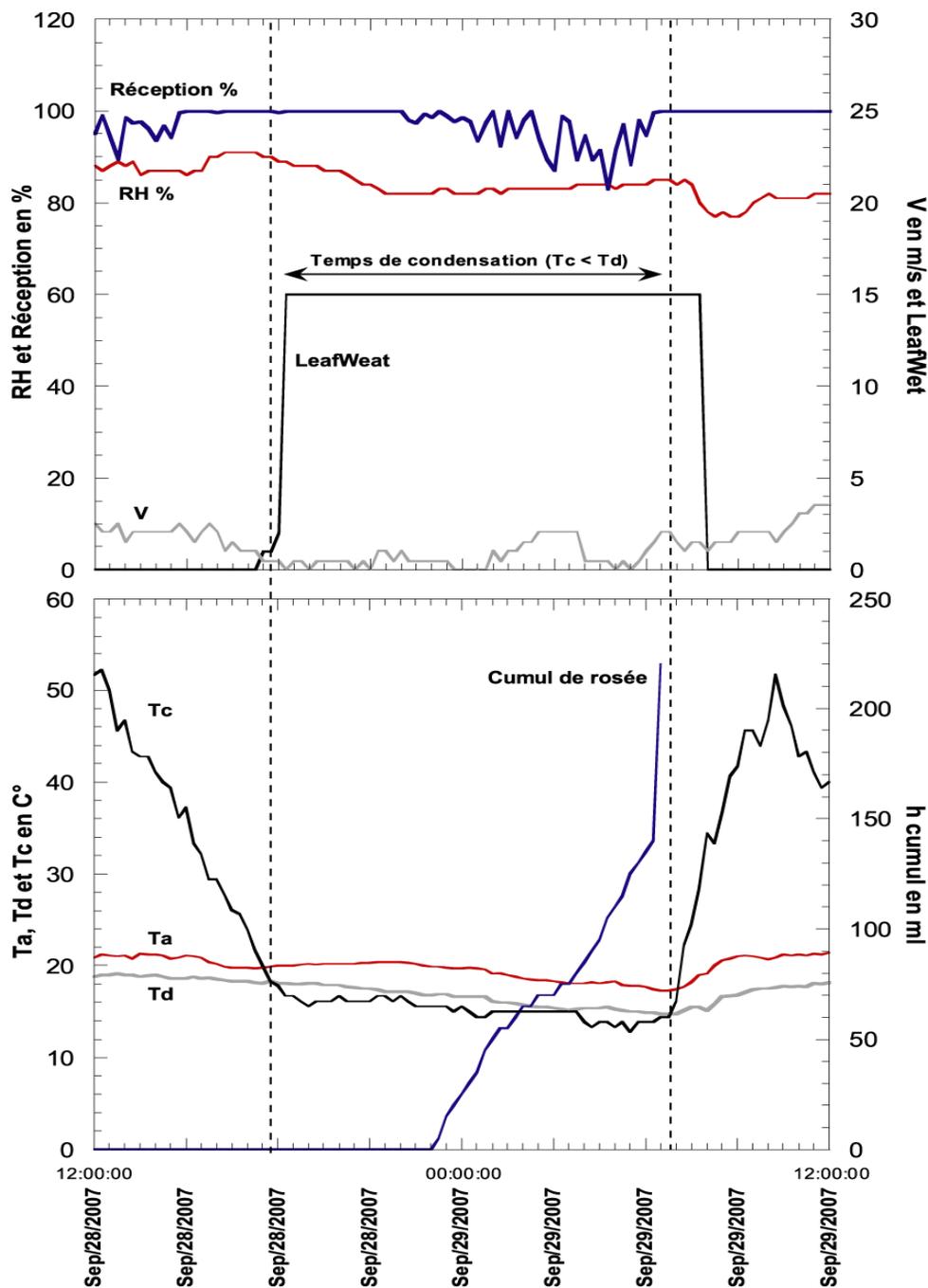


Figure IV.14 : Les facteurs climatiques influençant le phénomène de la condensation donnés par la station Weatherlink lors d'un cumul de rosée de 220 ml : $RH\%$, $LeafWet$ (Arrosage Foliaire : valeurs retenues 15 ou 0), %Récept (pourcentage de réception qui donne la qualité de la transmission), V (m/s), T_a ($^{\circ}C$), T_d ($^{\circ}C$), T_c ($^{\circ}C$) et Rosée dh/dt à Mirleft.

IV.5.1 L'humidité relative (RH %)

Le taux de condensation dépend de l'humidité relative RH (%), qui est exprimée aussi par la différence entre la température du point de rosée T_d (°C) et la température ambiante T_a (°C) (avec $\ln(RH) \approx T_a - T_d$). Les observations des données de cette année d'étude ont montré que la formation de gouttelettes d'eau commence dès que $RH > 65$ %. De nombreuses études menées sur les sites d'Ajaccio (France; Muselli et al, 2006), Zadar, Komiza et Biševó (Croatie; Mileta et al., 2006), Kothara (Inde; Sharan et al., 2006) ont déjà corrélées le rendement de rosée par rapport à RH et ($T_a - T_d$). Dans la Figure IV.15, la ligne représente cette corrélation qui s'écrit selon l'équation (1) :

$$h = \frac{h_0}{\Delta T_0} [\Delta T_0 - (T_d - T_a)] \quad (IV.1)$$

ΔT_0 est la température de refroidissement maximal et h_0 est le rendement le plus élevé. Durant cette étude, $\Delta T_0 = -7$ °C qui correspond à une humidité relative de 63 % et $h_0 = 0,45$ mm/jour. Cette relation à elle seule ne peut pas donner une estimation exacte du rendement de rosée pour une simple raison : l'existence d'autres paramètres (vitesse et direction du vent, couverture nuageuse) qui influence ce phénomène.

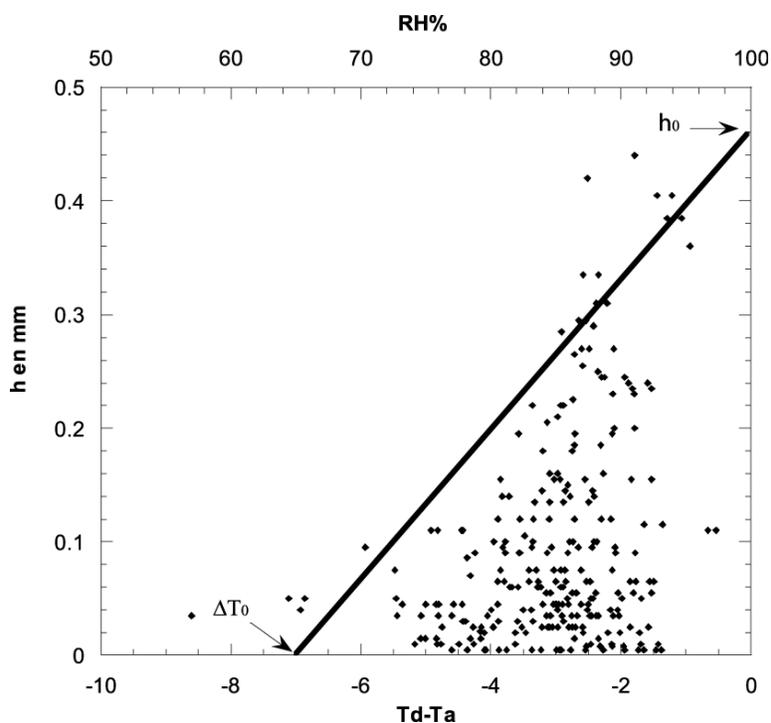


Figure IV.15 : Rendements de rosée exprimés en fonction des valeurs moyennes entre 20:00 et 6:00 de RH % et $(T_a - T_d)$ en $^{\circ}C$ pour la période du 01/05/07 - 31/04/08.

IV.5.2 La couverture nuageuse N (octas)

La nébulosité joue un rôle primordial dans le phénomène du refroidissement radiatif de la surface qui condense l'humidité de l'air sous forme de rosée. Des valeurs élevées de la couverture nuageuse induisent une diminution du pouvoir radiatif et par conséquent des faibles taux de condensation. Pour nos données, la corrélation entre ces deux paramètres montre bien que les taux les plus élevés de rosée correspondent aux nébulosités faibles (Figure IV.16). Pour le même état de couverture nuageuse, on peut mesurer des rendements en eau nuls, ceci est expliqué par le fait que l'humidité relative pour ces événements est trop faible ou que la composante convective du vent est trop importante. Il est à noter que les mêmes conditions ont été signalées pour la comparaison des moyennes de RH et N pour l'année 2003 à Ajaccio (Muselli et al., 2006).

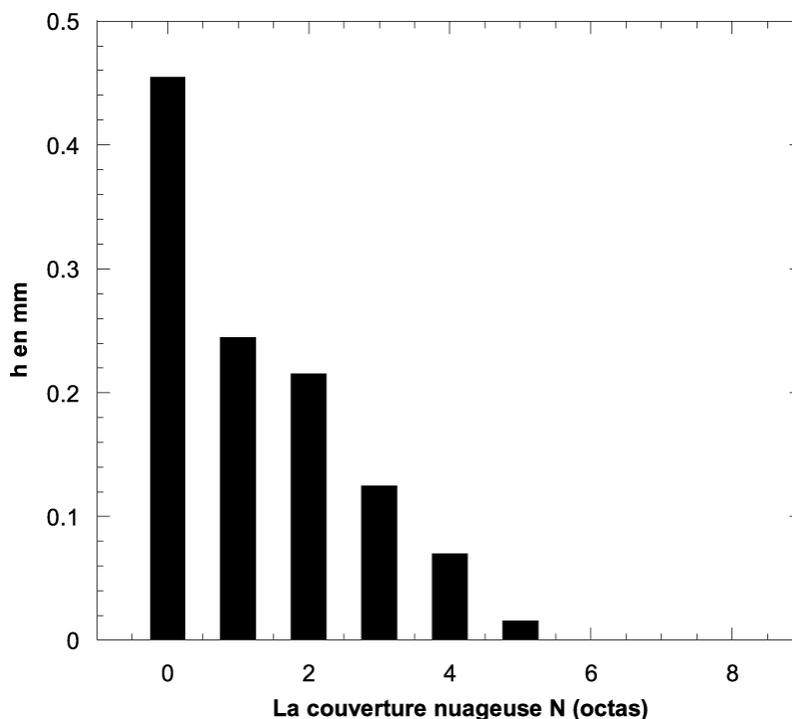


Figure IV.16 : Corrélation entre la nébulosité nocturne moyenne (20 :00 et 6 :00) et le volume d'eau condensée sur le site de Mirleft. On remarque la diminution du rendement de la rosée avec des couvertures nuageuses importantes.

IV.5.3 La vitesse du vent V (m/s)

Le vent est un facteur climatique important pour véhiculer les masses d'air humide vers les endroits où l'on peut exploiter la vapeur d'eau comme ressource alternative. Cependant, les vents de grandes vitesses ont tendance à annuler la formation de rosée (Beysens et al., 2003). Pour cette étude, l'analyse des vitesses moyenne du vent nocturne a montré que le taux de condensation est nul pour les vitesses supérieures à 5.7 m/s (Figure IV.17). Il est à noter que la vitesse du vent est extrapolée pour une hauteur $z = 10$ m on utilisant l'expression classique du profil logarithmique du vent au voisinage du sol (Monteith et Unsworth, 1990), avec z_c la rugosité caractéristique du sol (= 0,1 m) et la vitesse du vent est mesurée par un anémomètre à coupelle situé à 5.7 m au dessus du sol.

$$V_z = \frac{V_{10} \ln\left(\frac{z}{z_c}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_c}\right)} \quad (\text{IV.2})$$

La formation de rosée pour $V_{10} > 3$ m/s est expliquée par le fait que les condenseurs se trouvent sur un toit protégé par le mur (sorte de brise vent). Les résultats obtenus en Corse

(Ajaccio) montre que la formation de la rosée est suspendue pour des vitesses supérieures à 4.4 m/s (Muselli et al., 2002). À peu près les mêmes valeurs (4 m/s) ont été reconnues pour une expérience en Tanzanie (Nilsson, 1996).

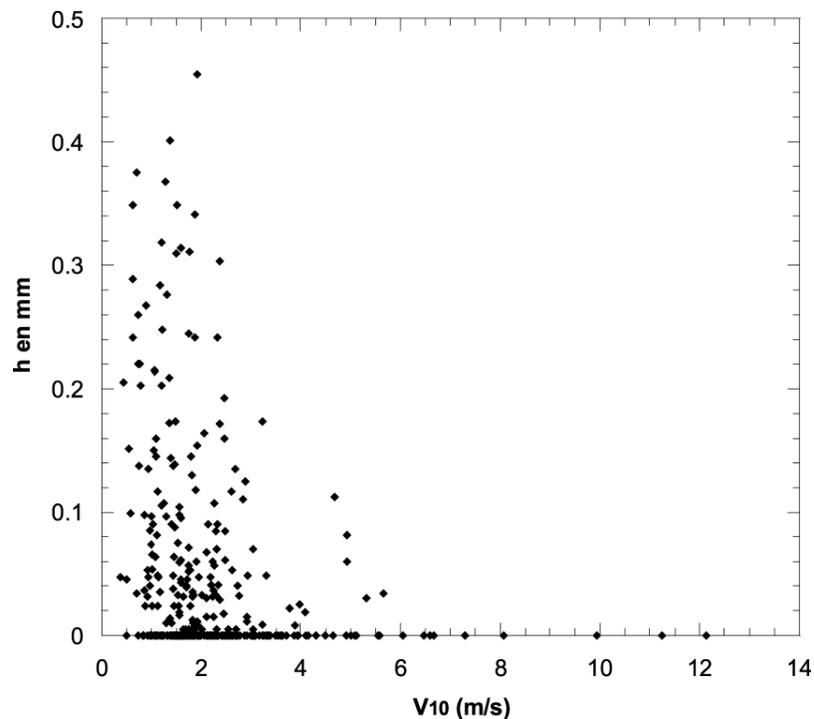


Figure IV.17 : Corrélation entre le volume d'eau (rosée) en mm et la Vitesse du vent en m/s extrapolée à 10 m.

IV.5.4 Relation entre V, RH, h et la direction du vent

A partir des Figs IV.18 et IV.19 qui représentent le rendement de chacun des 4 condenseurs en fonction des différentes directions du vent et de sa vitesse, on remarque que le condenseur orienté vers le Nord a un rendement en eau plus élevé que les autres. Ceci est dû aux directions du vent qui sont en majorités océaniques à caractère humide avec des vitesses généralement inférieures à 4 m/s à l'exception de 11 événements. Pour les directions NE, malgré les faibles vitesses (≤ 3 m/s) et les fortes humidités relatives ($\geq 80\%$), on note de faibles rendements induits par les fluctuations au niveau de la couverture nuageuse.

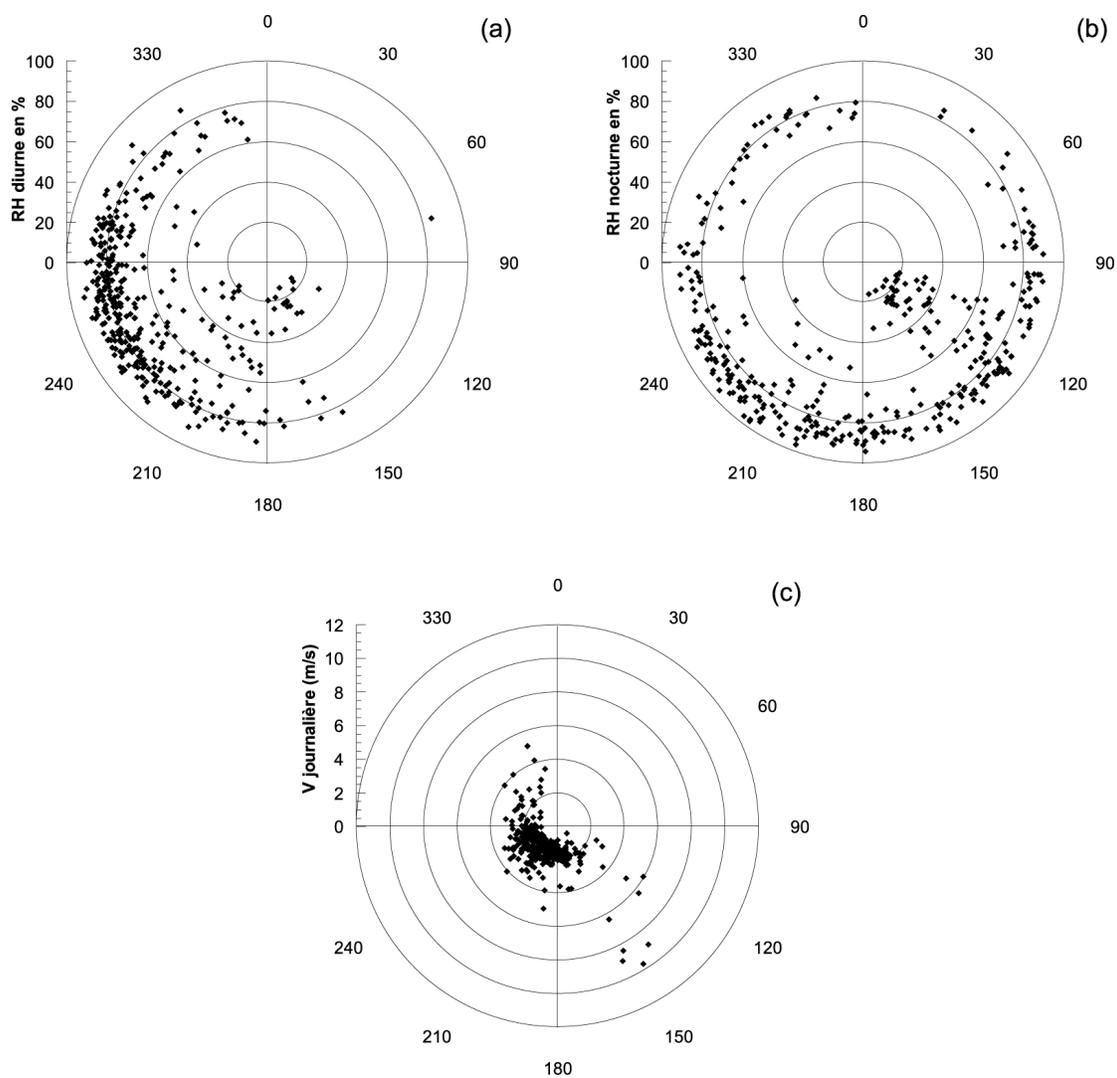


Figure IV.18 : L'humidité relative diurne et nocturne RH (%) et la vitesse du vent V (m/s) extrapolée à 10 m et représentés en fonction de la direction du vent durant 12 mois depuis mai 2007 jusqu'à avril 2008. (a) : Le jours, la dominance des masses d'aires (océaniques) d'ouest. (b) : La nuits, les masses d'aires d'origine océanique et continentale. (c) : la majorité des vitesses journalières du vent est océanique.

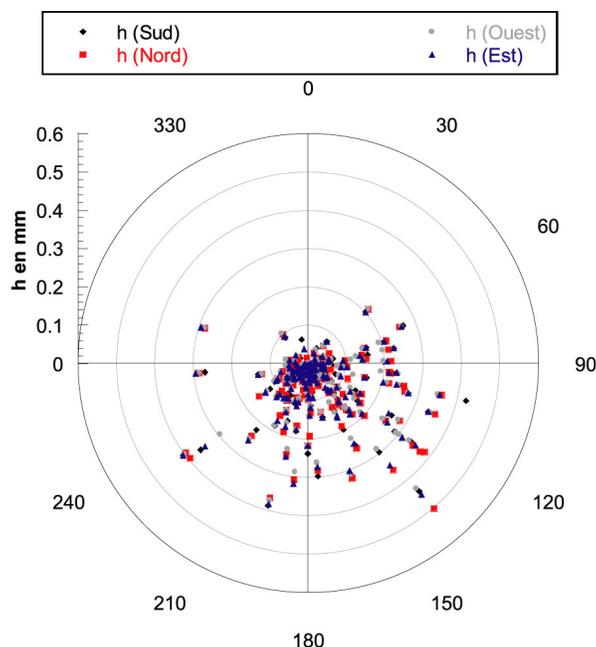


Figure IV.19 : Rendements de rosée en fonction de la direction du vent pour les quatre condenseurs orientés vers chaque point cardinal et pour la période de mesure du 01/05/07 à 30/04/08.

IV.5.5 La température de surface

De nuit, de grandes surfaces telles que des toitures peuvent être refroidies de 1 à 10 degrés en dessous de la température ambiante par dissipation d'une énergie radiative de l'ordre de 60 à 100 W m⁻² par ciel clair (Berdahl, 1995 in Clus, 2007). Dans cette étude, des mesures de température de surface T_c (°C) ont été menées sur deux condenseurs orientés vers deux directions différentes (Est et Nord) afin de déterminer s'il y a un changement dans leur pouvoir radiatif.

L'évolution du rendement de la rosée et la température de surface durant l'année sont présentées sur la Figure IV.20. Dans le cas général, dès que $T_c < T_d$ à la tombée du jour, la condensation se manifeste par la formation des gouttes d'eau à la surface du condenseur. Durant cette étude, la saison sèche est caractérisée par une température de surface du condenseur plus importante par rapport à celle des saisons de transition et humide. Cette différence peut être expliquée par les caractéristiques climatiques de chaque saison et par la couverture nuageuse qui influence le pouvoir radiatif des condenseurs et par conséquent le rendement de rosée.

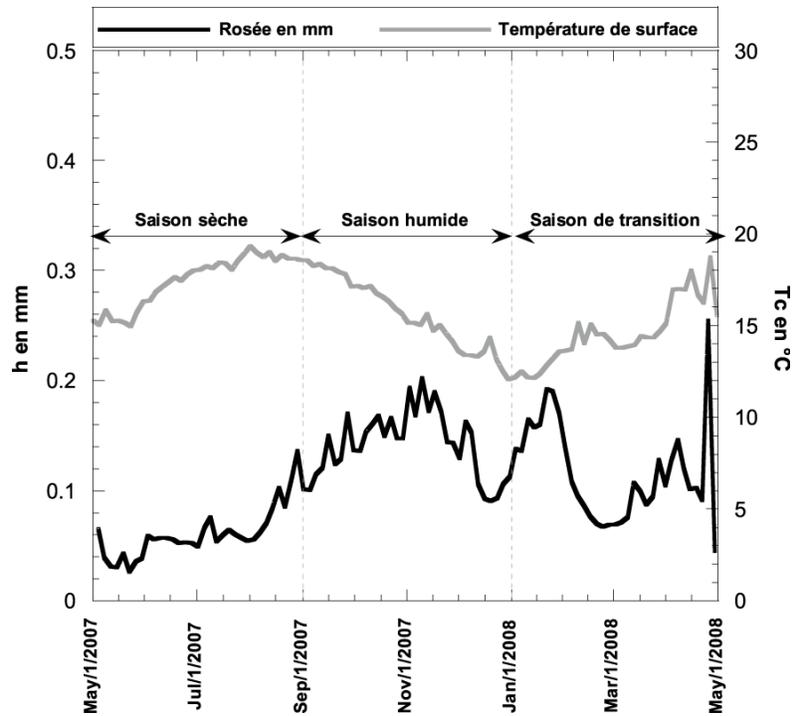


Figure IV.20 : Evolution du rendement de la rosée et la température de surface durant l'année d'étude. Quand T_c est importante, la quantité de vapeur d'eau condensée est faible.

IV.6 Analyse statistique

Afin d'approcher le mieux possible les jours où il y a condensation de vapeur atmosphérique à Mirleft, nous allons engendrer une classification des données par des méthodes statistiques. Nous verrons ainsi les données et les techniques utilisées, puis les résultats de la classification, c'est-à-dire les jours les plus représentatifs de la classe.

La classification concerne la base de données climatiques quotidiennes sur une période d'une année, du 1er Mai 2007 au 30 avril 2008. De nombreux paramètres climatiques à l'échelle quotidienne sont à notre disposition. La rosée est un phénomène important qui, malgré la complexité de sa formation et de sa prévision, doit être introduit dans cette classification. Ainsi, en partant des données sur la couverture nuageuse (N), nous avons effectué un traitement statistique qui nous a permis de sortir les jours avec présence ou non d'un ciel clair ($N = 0$). Nous obtenons ainsi un fichier de données à 7 colonnes (variables : T_a (°C), RH (%), T_d (°C), V_v (m/s), D_v (°), N (octas), Rosée (mm)) et 365 observations pour les 12 mois d'étude.

Afin de répondre à l'objectif de notre travail, il nous faut établir une partition d'un certain nombre d'observations en un certain nombre de classes. Plusieurs méthodes de classification sont à notre disposition, mais nous ne retiendrons que les méthodes automatiques qui permettent aisément de mieux justifier le nombre de classes choisies.

Pour traiter le fichier de données et obtenir la classification désirée, nous allons effectuer une Analyse en Composante Principale (ACP) et une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) sur facteurs (Berthelot, 2005). Le calcul est effectué sur le logiciel STATISTICA.

IV.6.1 La complémentarité entre l'ACP et la CHA

Les analyses multivariées et principalement l'ACP sont souvent employées dans l'analyse de longues séries de données météorologiques. Les représentations graphiques obtenues grâce à l'ACP permettent d'obtenir rapidement une sorte « d'image de la réalité ». Elles constituent donc une approximation visuelle du tableau de données. Le but de cette analyse est de résumer la structure de données décrites par les variables quantitatives, tout en obtenant des facteurs non corrélés entre eux. Ces facteurs peuvent être utilisés comme de nouvelles variables permettant d'effectuer une classification automatique en ne tenant compte que de l'information essentielle, c'est-à-dire en ne conservant que les premiers facteurs.

L'apport de la classification est une opération complémentaire de synthèse. Un individu est caractérisé par son appartenance à un groupe précis. Ce sont les caractéristiques moyennes de ce groupe qui résument alors les individus du groupe. A elle seule, l'ACP connaît de

nombreuses insuffisances. Il est toujours difficile d'interpréter les axes ou plans factoriels au-delà du plan principal. De plus, si nous ne retenons que les axes les plus représentatifs, nous pouvons être confrontés à une compression excessive des données. Mais les méthodes factorielles sont nécessaires, malgré leurs insuffisances : la visualisation des résultats sous forme d'ensemble géométrique reste irremplaçable. Pour observer l'organisation spatiale des classes, le positionnement de classes sur les axes factoriels s'avère indispensable. L'objectif de ces techniques est de découvrir des groupes d'individus homogènes. L'analyse factorielle peut mettre en avant des facteurs latents (cachés) inattendus.

IV.6.2 Les résultats de l'analyse statistique

Il est équivalent d'effectuer une classification des individus à partir d'un ensemble de variables ou à partir de l'ensemble des facteurs issus de l'analyse factorielle (Tableaux IV.5, IV.6, Figure IV.21). On peut, néanmoins, ne prendre en compte qu'un sous-espace factoriel et effectuer une classification sur les premiers axes factoriels. Cela présente l'avantage d'éliminer des fluctuations aléatoires qui constituent en général l'essentiel de la variance prise en compte par les derniers axes. Le fait d'abandonner les derniers facteurs revient à « lisser » les données, ce qui en général améliore la partition en produisant des classes plus homogènes.

La CAH fournit un grand nombre de partitions parmi lesquelles on doit en choisir une : il n'est souvent pas aisé de choisir la coupure significative. D'autre part, l'arbre hiérarchique obtenu n'est pas un arbre optimal puisque la partition construite à un niveau donné dépend de la partition obtenue à l'étape précédente. La procédure de la CAH agrège les éléments suivant un algorithme de classification hiérarchique utilisant le critère d'agrégation de Ward (critère de la variance). La CAH suit la procédure réalisée avec l'ACP et est effectuée sur les 4 premières composantes. Les résultats peuvent être visualisés graphiquement grâce à un arbre hiérarchique ou dendrogramme (Figure IV.22).

Notre principal souci est alors d'obtenir une certaine homogénéité du nombre d'effectifs présents dans chaque classe. Les nombreuses partitions effectuées au cours de cette analyse justifient le choix d'une partition en 4 classes bien distinctes présentant des effectifs plus ou moins hétérogènes (Figure IV.23).

Tableau IV.5 : Matrice des corrélations

Variables	T_a (°C)	RH (%)	T_d (°C)	Vv (m/s)	Dv (°)	N (octas)	Rosée (mm)
T_a (°C)	1.00						
RH (%)	-0.45	1.00					
T_d (°C)	-0.08	0.91	1.00				
Vv (m/s)	0.16	-0.35	-0.35	1.00			
Dv (°)	-0.03	0.26	0.28	0.17	1.00		
N (octas)	0.06	0.15	0.22	0.20	0.36	1.00	
Rosée (mm)	-0.29	0.31	0.16	-0.26	-0.19	-0.65	1.00

Tableau IV.6 : Contributions relatives des critères pour les deux premiers axes.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Facteur 5
T_a (°C)	-0,51	-0,16	0,68	-0,50	-0,06
RH (%)	0,95	-0,21	-0,03	-0,01	-0,19
T_d (°C)	0,84	-0,34	0,29	-0,18	-0,21
Vv (m/s)	-0,55	-0,31	-0,52	-0,33	-0,47
Dv (°)	0,21	-0,66	-0,33	-0,43	0,48
N (octas)	-0,03	-0,88	0,04	0,33	-0,13
Rosée (mm)	0,48	0,71	-0,19	-0,34	-0,08
Variance totale (%)	35,12	28,42	13,70	11,37	7,91

Après l'analyse factorielle, nous prenons les cinq premiers facteurs pour avoir 96,52% de la variance, même si les deux premiers axes contiennent l'essentiel de l'information. RH et T_d : humidité relative et température de rosée. Rosée, N et Dv : nébulosité et direction du vent.

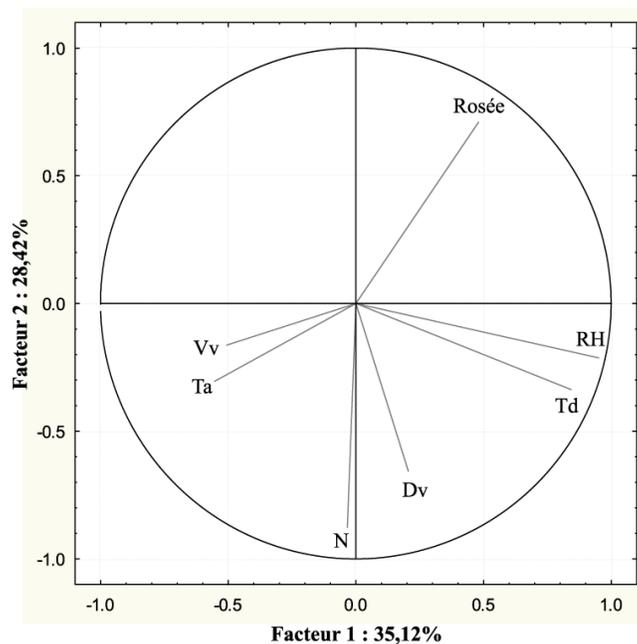


Figure IV.21 : Projection des variables sur le premier plan factoriel. Comme on a pu l’observer dans la matrice des corrélations, l’humidité relative et la température de rosée contribuent fortement à la formation de l’axe F1. La rosée, couverture nuageuse (nébulosité) et la direction du vent contribuent quant à elles à la formation de l’axe F2.

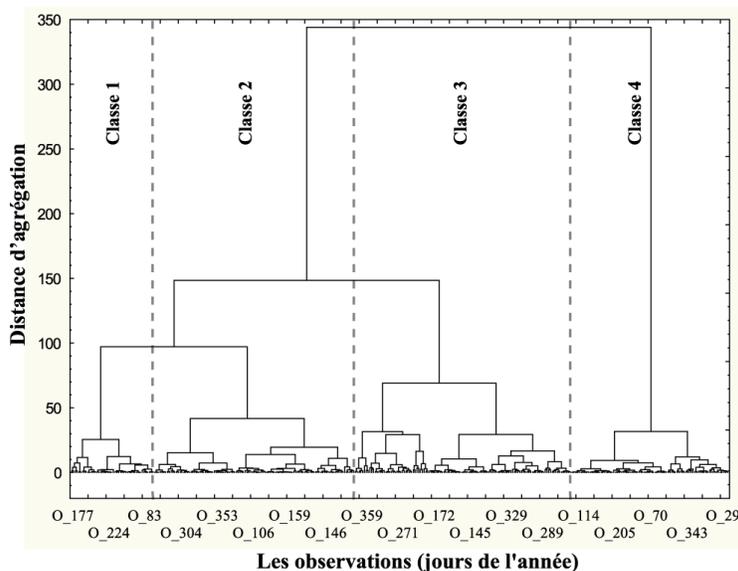


Figure IV.22 : Classification journalière de la base de données (365 observations) sous forme d’un arbre hiérarchique ou dendrogramme avec la méthode de Ward.

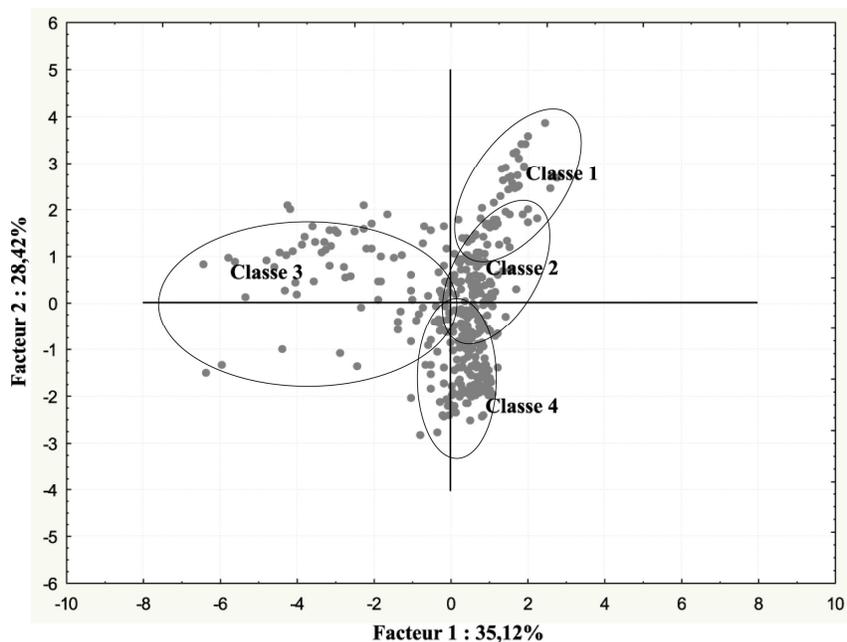


Figure IV.23 : Projection des observations (jours de l'année) et les classes issues de l'analyse en composante principale et de la classification hiérarchique ascendante sur le premier plan factoriel.

IV.6.3 Description des classes

Cette dernière procédure vise à décrire chacune des classes à travers les variables climatiques mesurées, nous avons choisi comme variable déterminante la nébulosité. Ainsi la Classe 1 correspond à un ciel clair avec une nébulosité moyenne de 0 octas, Classe 2 de 2.6 octas, Classe 3 de 4.25 octas et Classe 4 de 7 octas.

Le Tableau IV.7 résume les valeurs moyennes qui caractérisent le mieux chaque classe. Il est alors possible d'interpréter ces résultats. Les distinctions sur l'état du ciel et l'humidité relative ont été réalisés. On constate que la Classe 2 qui représente 30,49% des jours et la Classe 4 avec 23,90% ont une forte humidité mais elles ont des rendements de rosée différents. Pour la Classe 1 (12,64% des jours), elle est caractérisée par un rendement de rosée moyen élevé par rapport aux autres et un cumul important.

Cette classification découpe de manière générale les types de temps pour la formation de la rosée durant cette année d'étude : beau temps (Classe 1), temps moyen (Classe 2), temps variable (Classe 3) et mauvais temps (Classe 4).

Tableau IV.7 : Caractéristiques des classes en fonction des moyennes de chaque variable.

	Variables	N	RH	Ta	Td	Vv	h moy	h somme
Classes								
Classe1	Moyenne	0	74,20	17,81	12,10	1,54	0,183	8,46
	Minimum	0	18,63	13,92	-1,33	0,44	0	
	Maximum	0	95,32	25,86	18,85	3,22	0,395	
	Ecart type	0,44	22,07	3,03	4,90	0,61	0,149	
	Effectif	46	46	46	46	46	46	
Classe2	Moyenne	2,6	83,93	17,96	15,16	1,89	0,082	9,05
	Minimum	1	70,32	13,06	9,93	0,38	0	
	Maximum	3	96,71	22,24	19,09	5,65	0,255	
	Ecart type	0,63	4,69	2,18	2,44	1,01	0,058	
	Effectif	111	111	111	111	111	111	
Classe3	Moyenne	4,25	61,41	19,20	9,78	2,68	0,008	1,03
	Minimum	2	14,05	12,79	-5,01	0,73	0	
	Maximum	6	91,56	29,25	19,63	12,13	0,110	
	Ecart type	0,89	24,59	3,65	6,41	1,94	0,014	
	Effectif	120	120	120	120	120	120	
Classe4	Moyenne	7	84,45	18,61	15,89	2,30	0	0
	Minimum	7	63,51	12,77	6,34	0,49	0	
	Maximum	7	96,34	23,43	19,32	5,12	0	
	Ecart type	0	7,82	1,94	2,89	0,98	0	
	Effectif	87	87	87	87	87	87	

Un autre travail peut nous aider à mieux discerner les classes entre elles : l'évolution des effectifs des classes en pourcentage en fonction des mois (Figure IV.24). Nous voyons parfaitement que la Classe 1 est très présente dans les mois de mai, septembre, octobre, novembre et décembre (12,64% des types de temps), la Classe 2 est bien répartie dans les mois juillet, août, octobre et mars (30,49% des types de temps). La Classe 3 qualifiée du temps variable, a un effectif important en janvier, février et avril (32,97% des types de temps). Le mauvais temps symbolisé par la Classe 4 est bien représenté dans le mois de juin, juillet, août et septembre (23,90% des types de temps).

Nous verrons que cette répartition des classes est primordiale dans la distinction entre les saisons de collecte de la rosée : la saison humide est présentée par la Classe 1, la saison de transition par la Classe 3 et enfin la Classe 4 est très présente en saison sèche. Contrairement aux classes, la Classe 2 est présente presque dans toutes les saisons mais avec des effectifs différents. En conclusion, ce graphique nous donne un aperçu presque exhaustif des types de

temps favorables ou non à la formation de la rosée durant une année, depuis mai 2007 jusqu'à avril 2008 à Mirleft.

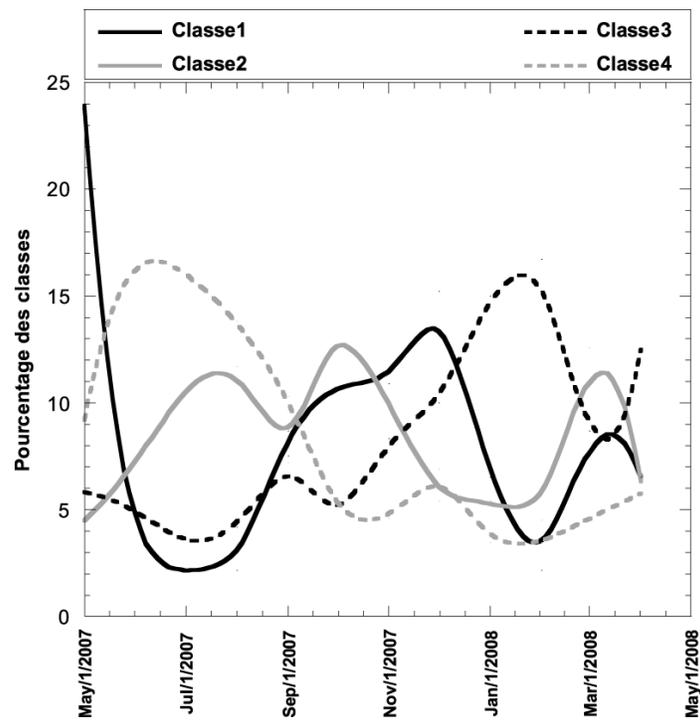


Figure IV.24 : Répartition et évolution des pourcentages des classes par mois durant l'année d'étude.

IV.7 Modèles d'estimation de la rosée

IV.7.1 Modèle physique (OPUR)

Le taux de condensation est la quantité d'eau produite chaque jour à partir de l'humidité atmosphérique. Il varie en fonction du temps et de l'espace c'est-à-dire qu'il dépend des paramètres météorologiques de chaque région et atteint son maximum avant le lever du soleil (6 :00 du matin) l'heure où T_a , T_d , RH sont bien favorables pour la condensation de la rosée [$h = f(RH, N, V, T_a, T_d)$]. Pour estimer le taux de condensation à partir de ces données climatiques, des chercheurs spécialistes de l'équipe française ont élaboré une équation qui dépend de ces variables climatiques suivantes (OPUR) :

- * L'altitude de la région étudiée
- * La couverture nuageuse en octas (1/8)
- * La vitesse du vent en (m/s), mesurée à 10 m de hauteur de la surface de terre
- * La température de point de rosée en (°C)
- * La température de l'air en (°C)

La Figure IV.25 compare les résultats simulés avec les enregistrements des volumes d'eau condensée. La comparaison par événement (Figure IV.25a) montre des écarts importants sur les valeurs individuelles. Les cumuls sont plus représentatifs. Le deuxième graphique montre pour six mois de mesure une évolution parallèle des valeurs cumulées de simulation et de mesure.

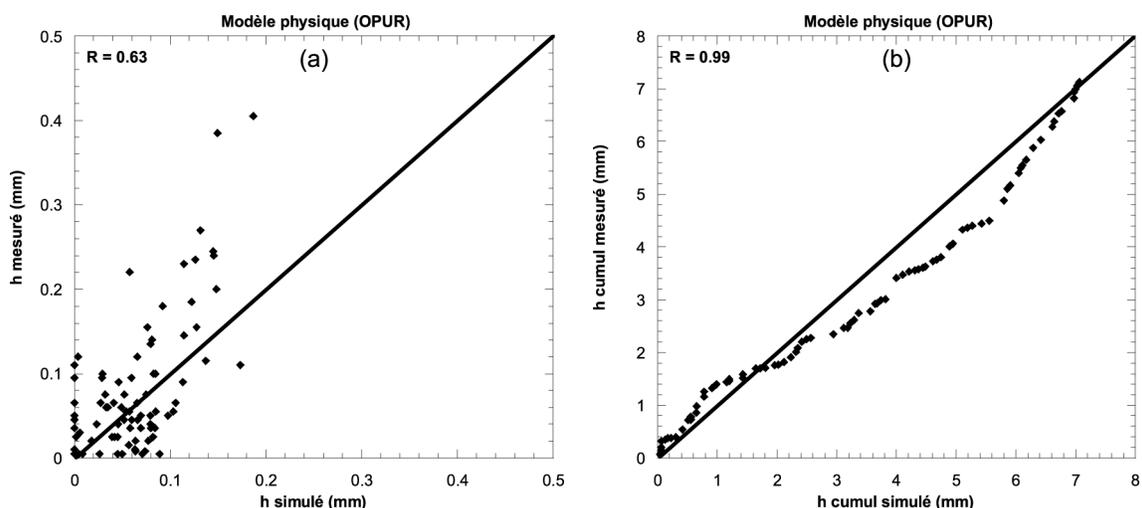


Figure IV.25 : (a) illustre la comparaison des rendements simulés en fonction des valeurs mesurées. (b) montre les cumuls comparés des volumes simulés et mesurés sur l'ensemble de la période du 01/05/2007 au 30/10/2007.

IV.7.2 Modèle réseau de neurone

Les réseaux de neurones artificiels, connus généralement sous l'acronyme ANN (Artificial Neural Network), sont des modèles mathématiques non linéaires capables d'établir des relations entre les entrées et les sorties d'un système. Les performances de ces derniers dans la modélisation non linéaire ont été prouvées dans plusieurs domaines de l'ingénierie et de la science. Dans le domaine de l'ingénierie essentiellement en géotechnique on peut citer Najjar et Ali (1998a), (1998b) et Najjar et Zhang (2000) qui ont appliqué les RNA pour l'évaluation de la perméabilité des argiles et la liquéfaction des sols.

Le réseau de neurone est constitué de fonctions linéaires ou non linéaires associées, formant ainsi un réseau constitué de plusieurs couches (généralement deux couches : l'une que nous nommerons "cachée", l'autre couche intégrant la fonction de sortie). A chaque entrée de ces fonctions est associée une pondération déterminée à partir d'une phase d'apprentissage.

Modéliser une variable à partir d'un réseau de neurones nécessite plusieurs phases :

- Choix des variables d'entrées (qui seront pour nous les moyennes journalières des paramètres climatiques).
- Choix de la fonction d'activation et de l'architecture du réseau
- Choix de l'algorithme permettant de déterminer les différentes pondérations des connections. L'algorithme de Levenberg-Marquardt que nous utiliserons est une méthode dérivée de l'approche Gauss Newton utilisée pour l'optimisation de l'erreur quadratique (entre la sortie mesurée et la sortie calculée).

La base de données retenue représente un ensemble quotidien de 2 mois de valeurs de paramètres climatiques mesurés sur le site étudié. Par conséquent, le modèle de RNA est développé en deux phases : phase d'apprentissage (calibrage) et phase de test (généralisation ou validation). Dans la phase d'apprentissage, la plus grande partie de la base de données est employée pour entraîner le réseau et la partie restante est utilisée pour le test du réseau. Le sous-ensemble de test est habituellement employé pour choisir le modèle le plus performant.

La phase d'apprentissage du modèle est arrêtée quand les valeurs des erreurs quadratiques moyennes (*ASE*) atteignent un seuil donné. Le but de l'apprentissage est d'atteindre une solution optimale basée sur certaines performances telles que l'erreur *ASE* et le coefficient de corrélation R^2 .

IV.7.2.1 Architecture du réseau

L'architecture du réseau précise le nombre de couches qui le composent et le nombre de neurones dans chaque couche, ainsi que le poids des connexions. Un réseau de neurones artificiels est organisé en couches, chacune de ces couches comportant plusieurs neurones. Chacun de ces neurones qui se présentent comme unité de calcul autonome, est relié à la totalité ou à certains neurones de la ou des couches précédentes par l'imposition de poids.

Le réseau de neurones utilisé dans notre étude est un réseau à trois couches : une couche d'entrée qui recevra les données source que l'on veut utiliser pour l'analyse, une seule couche cachée constituée par l'ensemble de neurones des sorties de la couche d'entrée et une couche de sortie qui donne le résultat obtenu après compilation par le réseau des données entrant dans la première couche (Figure IV.26).

Dans ce travail, l'utilisation d'une seule couche cachée est suffisante pour le modèle. Dans la majorité des cas, pour limiter le temps de calcul et surtout lorsque les résultats sont en général satisfaisants, c'est un réseau à une seule couche cachée qui est utilisé.

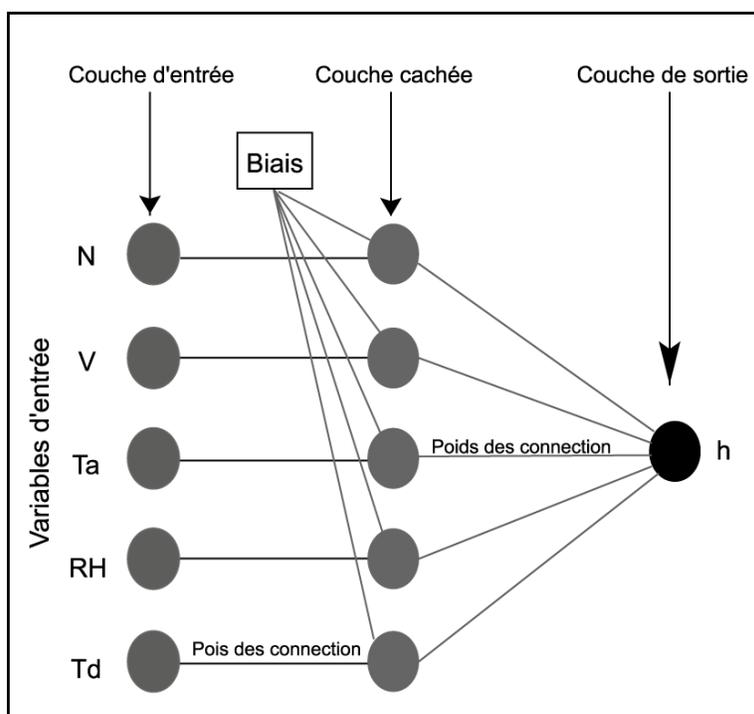


Figure IV.26 : Architecture du modèle réseau de neurone utilisée dans cette étude.

IV.7.2.2 Collecte des données

L'application de ce modèle a été effectuée sur les moyennes journalières des paramètres climatiques et de rosée de la région d'étude. Pour notre étude, pour prédire la rosée, nous avons utilisé à l'entrée du réseau des valeurs des facteurs météorologiques influençant le phénomène de la condensation.

- * La température ambiante (T_a)
- * La température de rosée (T_d)
- * L'humidité relative (RH)
- * La vitesse du vent (V)
- * La couverture nuageuse (N)

La base de données a été divisée en deux phases : La phase d'apprentissage et la phase de validation. L'apprentissage est la propriété la plus intéressante du modèle des réseaux de neurones. Pour apprendre, le réseau doit connaître la réponse qu'il aurait dû donner. C'est la phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Une fois le réseau calculé, il faut procéder à des tests pour vérifier que le réseau réagit bien comme on le souhaite : c'est la validation. La méthode la plus simple pour faire la validation est de garder une partie de l'échantillon réservé à l'apprentissage pour la validation et faire ainsi une validation hors-échantillon.

IV.7.2.3 Résultats et discussions

On a réalisé ce travail sur une base de donnée de six mois. Les deux premiers de cet ensemble sont utilisés pour la phase d'apprentissage. Pour la phase de validation, on a utilisé six mois afin de comparer les résultats avec ceux du modèle physique (OPUR).

Le logiciel qu'on a utilisé nous a permis de comparer entre trois modèles :

- Modèle linéaire
- Modèle polynomial
- Modèle réseaux de neurone

Les résultats obtenus sont représentés dans les figures ci-dessous qui illustrent une comparaison entre les diagrammes de données de rosée observés et simulés pour les phases d'apprentissage et de validation dans les trois modèles.

La comparaison des données simulées et mesurées forme un nuage de points situé autour de la droite linéaire ($y = x$) pour les différentes phases des trois modèles, linéaire,

polynomial et réseau de neurone. Les Figures IV.27, IV.28 et IV.29 illustrent les diagrammes de données de rosée simulés à $t+I$ pour les deux phases de modélisation respectivement l'apprentissage et la validation. La droite de nuage de points est répartie statistiquement selon une orientation de 45° (autour de la droite $y = x$). Les résultats obtenus montrent une très bonne concordance expliquée par un coefficient de corrélation élevé pour les deux phases, essentiellement dans le modèle de réseau de neurone. Ce qui indique que ces résultats sont très satisfaisants.

A. Modèle linéaire

Toute étude statistique commence par un modèle linéaire, ici :

$$h=W_0 + W_1N + W_2 V + W_3 T_a + W_4RH + W_5T_d \quad (IV.3)$$

En langage neuronal, les variables N , V , T_a , RH et T_d sont les neurones d'entrée, la variable h est le neurone de sortie, les coefficients W_0 , W_1 , W_2 , W_3 , W_4 et W_5 sont les valeurs des synapses ajustées au cours de l'apprentissage.

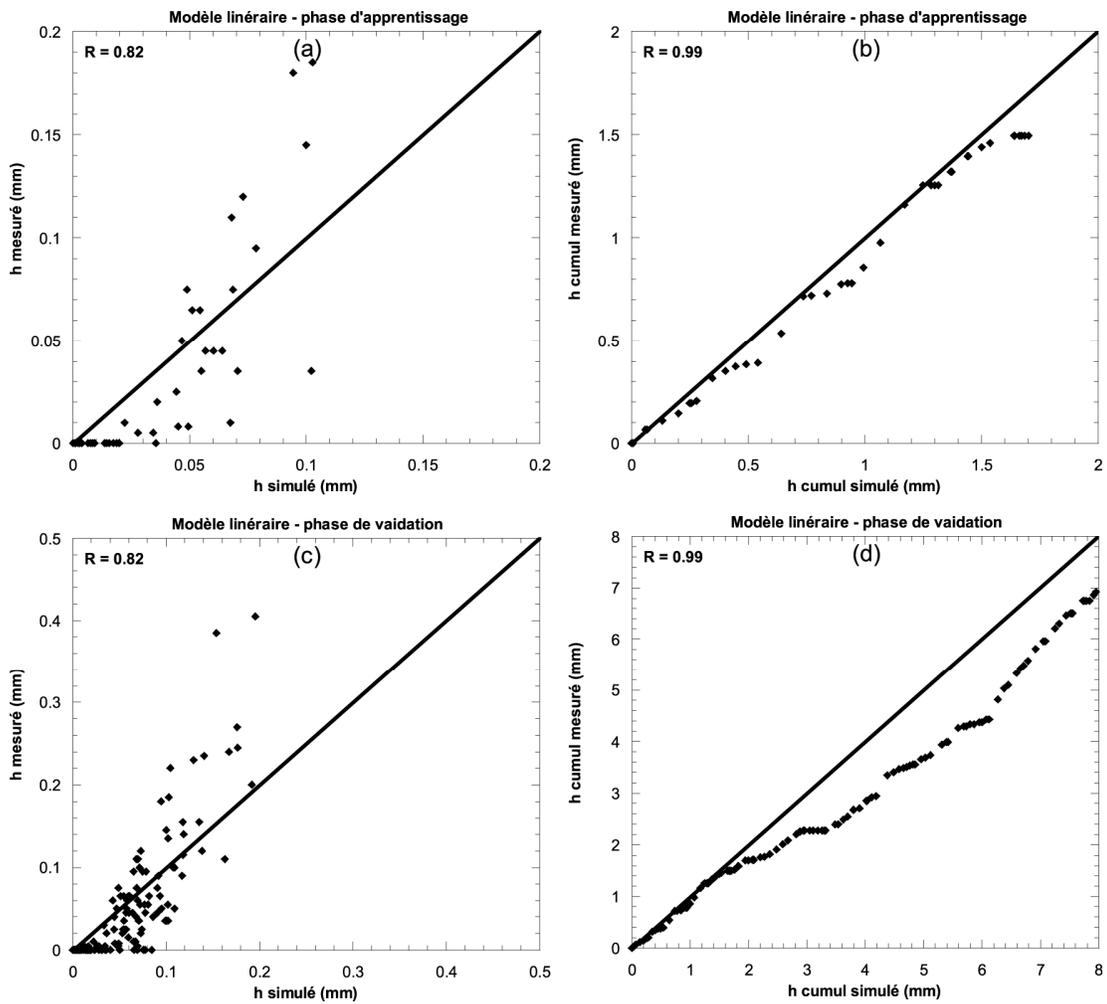


Figure IV.27 : (a, b) : Les figures illustrent la distribution des rendements simulés en fonction des valeurs mesurées (à gauche) et leurs cumuls (à droite) dans la phase d'apprentissage. Les figures (c) et (d) au dessous illustrent ceux de la phase de validation.

B. Modèle polynomial

Le modèle polynomial d'ordre 2 permet de caractériser l'influence des carrés et des produits croisés, c'est un modèle non linéaire par rapport aux variables d'entrée mais linéaire par rapport aux coefficients :

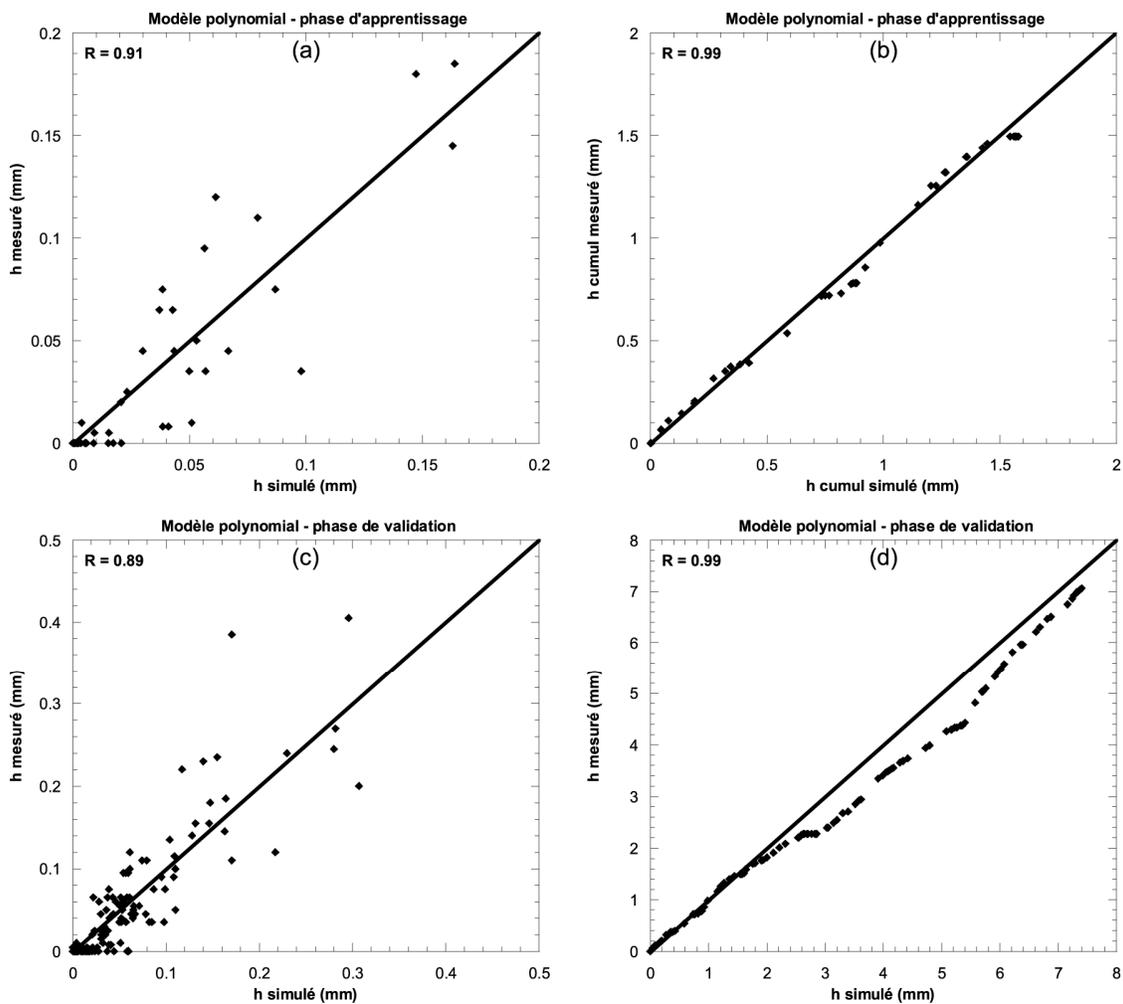


Figure IV.28 : (a, b) : Les figures illustrent la distribution des rendements simulés en fonction des valeurs mesurées (à gauche) et leurs cumuls (à droite) dans la phase d'apprentissage. Les figures (c, d) illustrent ceux de la phase de validation.

C. Modèle réseaux de neurone

Dans ce travail, nous avons utilisé un réseau de neurone de type perceptron multi-couche (multi-layer perceptron) MLP avec l'algorithme de Levenberg- Marquart dans la phase d'apprentissage et ceci pour prédire les quantités d'eau cumulée. Le MLP consiste en une couche d'entrée qui représente des données climatiques récoltées expérimentalement et qui sont les entrées du modèle, une couche cachée et une couche de sortie qui représente la valeur à prédire.

Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure IV.29 qui illustre une comparaison entre les diagrammes de données de la rosée mesurées et simulées, respectivement, pour les phases de modélisation, apprentissage et le test.

Les paramètres statistiques utilisés pour comparer la performance de ces modèles sont : l'erreur moyenne des carrés *ASE* (Average Squared Error), le coefficient de détermination R^2 et l'erreur moyenne absolue et relative *MARE* (Mean Absolute Relative Error).

Dans ces modélisations, la phase d'apprentissage du réseau a été effectuée de façon que la moyenne des carrés des erreurs (*ASE*) soit minimale. Dans ce cas, le modèle OPUR enregistre une valeur minimale d'erreur de l'*ASE* avec une moyenne de 2.10^{-8} mm, pendant la phase de validation, le réseau de neurone a une moyenne de 3.10^{-4} mm suivit du modèle polynomial (6.10^{-4} mm) et linéaire (46.10^{-2} mm).

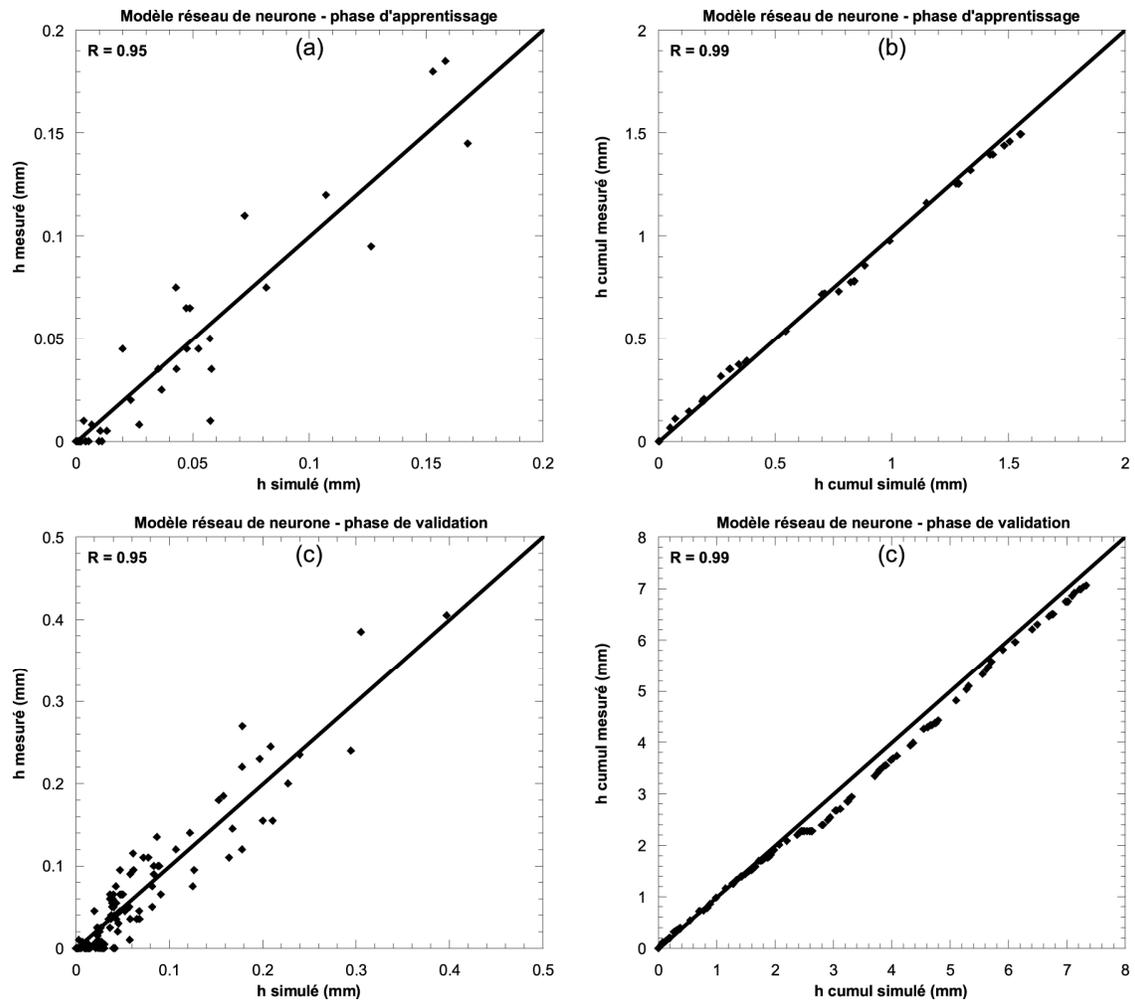


Figure IV.29 : (a, b) : Les figures illustrent la distribution des rendements simulés en fonction des valeurs mesurées (à gauche) et leurs cumuls (à droite) dans la phase d'apprentissage. Les figures (c, d) illustrent ceux de la phase de validation.

Les paramètres statistiques des valeurs estimées par les différents modèles et ceux des valeurs mesurées sont très proches avec une amélioration notable du coefficient de corrélation dans le modèle OPUR (Tableau IV.8).

La valeur maximale de h est bien estimée par le modèle de réseau de neurone (0,397 mm) et le cumul estimé par le modèle OPUR (7,063) est presque égal au cumul mesuré. Il est nécessaire de coupler le deux modèles afin d’avoir de bons résultats.

Tableau IV.8 : Comparaison entre les paramètres statistiques des différents modèles.

	Modèles				
	h mesurée	OPUR	Linéaire	Polynomial	Réseau de neurone
Moyenne	0,039	0,039	0,044	0,040	0,040
Minimum	0,005	0	0	0	0
Maximum	0,405	0,187	0,195	0,307	0,397
Somme	7,061	7,063	8,107	7,402	7,325
Ecart type	0,068	0,039	0,046	0,059	0,064
Effectif	183	183	183	183	183
ASE		2.00E-08	0,0059	0,0006	0,0003
R²		0,999	0,97	0,997	0,998

ASE : Erreur quadratique moyenne (Average Squared Error)

R² : Coefficient de détermination,

IV.8 Estimation du taux de condensation dans les régions marocaine

L'ensemble des points énoncés dans la partie précédente de modélisation nous permet de bien situer la complexité des paramètres climatiques liés au phénomène de condensation de la vapeur atmosphérique. Nous allons maintenant appliquer un des modèles existants pour essayer d'estimer les rendements de rosée dans différentes régions du Maroc.

IV.8.1 Cartographie de la rosée

IV.8.1.1 Les données météorologiques à disposition

Pour pouvoir appliquer un de ces modèles sur certaines régions du Maroc, les valeurs pour des différents paramètres demandés sont nécessaires. Ces différents paramètres étant directement définis sur la base de mesures effectuées sur Mirleft, nous présentons ici les données qu'il a été possible de trouver dans le cadre de la recherche bibliographique sur internet.

Les données météorologiques sont collectées régulièrement par les stations météorologiques du réseau national. Il s'agit de différents variables climatiques utilisées dans cette étude (T_a , T_d , RH , V , N). Les problèmes rencontrés durant cette partie sont dus à la couverture du territoire marocain par la grille des stations qui n'est pas assez dense et quelque fois le manque d'enregistrement horaire d'un paramètre, c'est pour raison qu'on a utilisé seulement les données enregistrées à 6h00 où le temps est idéal pour la formation de la rosée (OPUR). Dans cette partie, nous avons utilisé des graphiques à barres pour analyser la rosée dans les différentes régions du Maroc. On peut comparer la taille des barres dans chaque mois pour obtenir des informations sur le rendement potentiel des sites. Pour représenter l'humidité relative, on a utilisé des graphiques à secteurs dont le diamètre peut nous donner des informations concernant l'ampleur de l'humidité dans les zones étudiées.

IV.8.1.2 Carte de la rosée et de l'humidité relative

Le modèle utilisé (OPUR) nous a permis d'estimer la quantité de rosée mensuelle qu'on peut avoir dans quelques régions du Maroc. Par exemple, la Figure IV.30 montre l'évolution spatiale et temporelle de la rosée et de l'humidité relative durant six mois de l'année 2007 depuis mai jusqu'à octobre dans 15 villes marocaines.

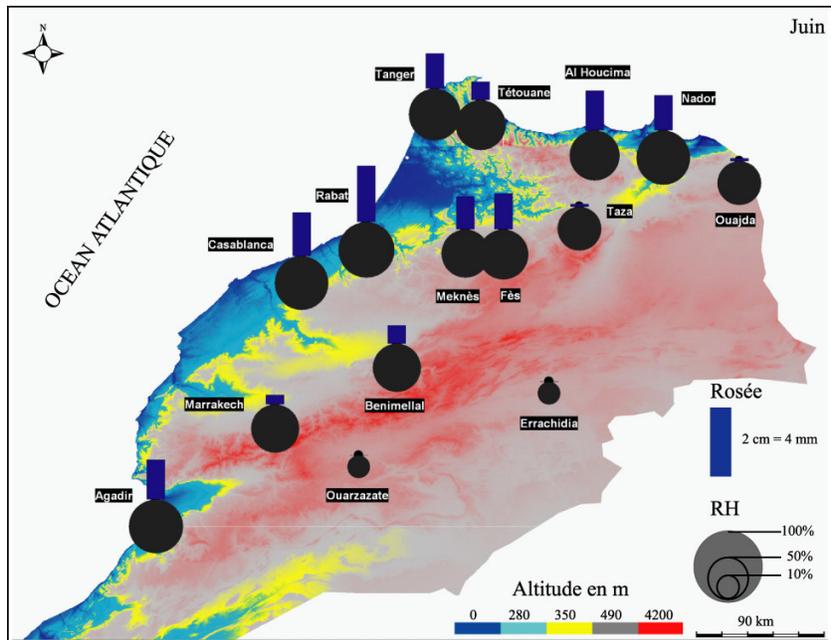
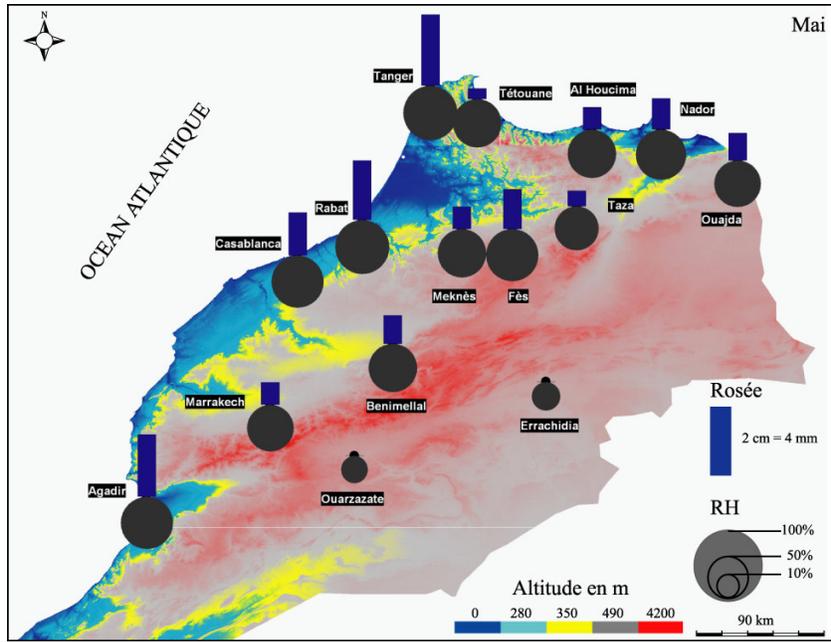
Les observations des données météorologiques montrent que les variables climatiques présentent une évolution spatio-temporelle en allant des côtes atlantiques et méditerranéennes vers l'intérieur et du nord vers le sud. L'humidité relative et la couverture nuageuse ont un parcours exclusivement marin et subissent l'effet de divergence induit par l'irrégularité des

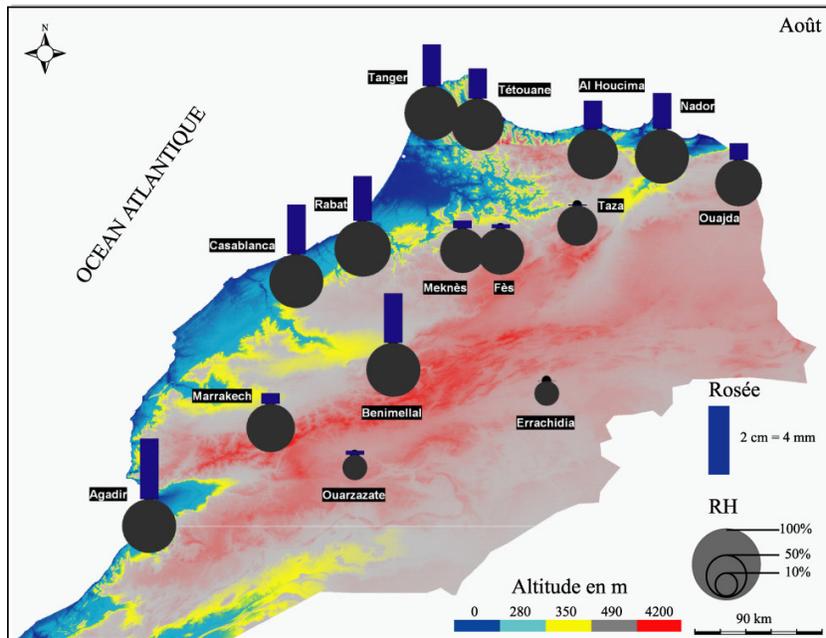
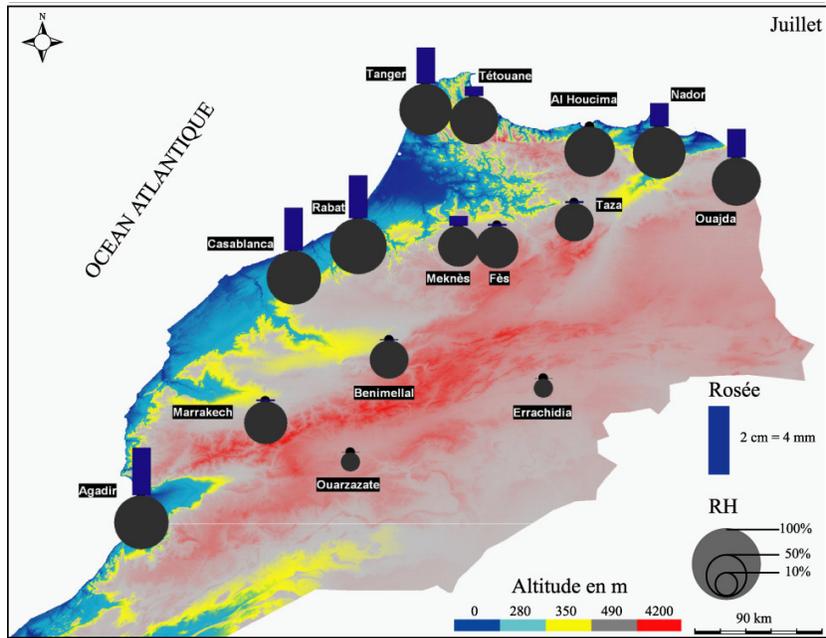
vitesse et des directions du vent qui ramènent les masses d'air riches en vapeur d'eau aboutissant à des taux d'humidité variables d'une station à l'autre. En effet, la régression de la rosée pour quelques stations côtières peut être expliquée par l'état du ciel nuageux ou des vents violents, entraînant une élévation de la température de la surface dans ces zones. Par contre dans les régions du centre et de l'est du Maroc, le climat chaud entraîne une faible humidité relative et par conséquent de faible rendement ou absence de la rosée.

L'étude et l'analyse de l'évolution spatio-temporelle du rendement de la rosée et de l'humidité relative sont indispensables à une meilleure connaissance du phénomène de la condensation à l'échelle du Maroc. De plus, les résultats de nos recherches permettent de constater que ces paramètres changent durant les mois étudiés et on peut parler d'une relative originalité régionale. Deux zones s'opposent nettement :

➤ Une zone humide qui s'étend le long du littoral atlantique et méditerranéen. Elle présente des rendements élevés de rosée avec une moyenne mensuelle qui dépasse pas 2 mm pour les villes d'Agadir, Casablanca, Rabat, Tanger et Nador, par contre Tétouan et Alhucima ont des rendements inférieurs aux autres, ceci est dû à la couverture nuageuse qui est importante dans ces régions. L'évolution de l'humidité relative durant les six mois est quasi constante, elle dépasse 75% à l'exception de quelques jours pour Agadir et Tétouan.

➤ Une zone non humide à l'intérieur du Maroc. Elle est caractérisée par de faible humidité à l'exception des villes de Marrakech, Benimellal, Meknès, Fès et Ouajda où les jours humide (>75%) peuvent s'observer fréquemment les mois de mai, juin, septembre et octobre, mais dans les autres villes le climat est sec particulièrement marqué par l'influence du Sahara marocain (Ouarzazate et Errachidia).





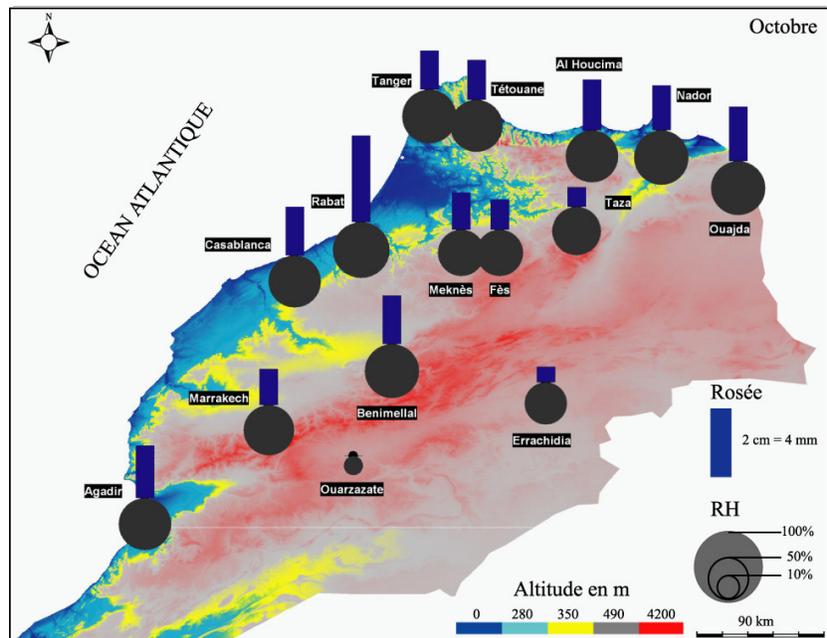
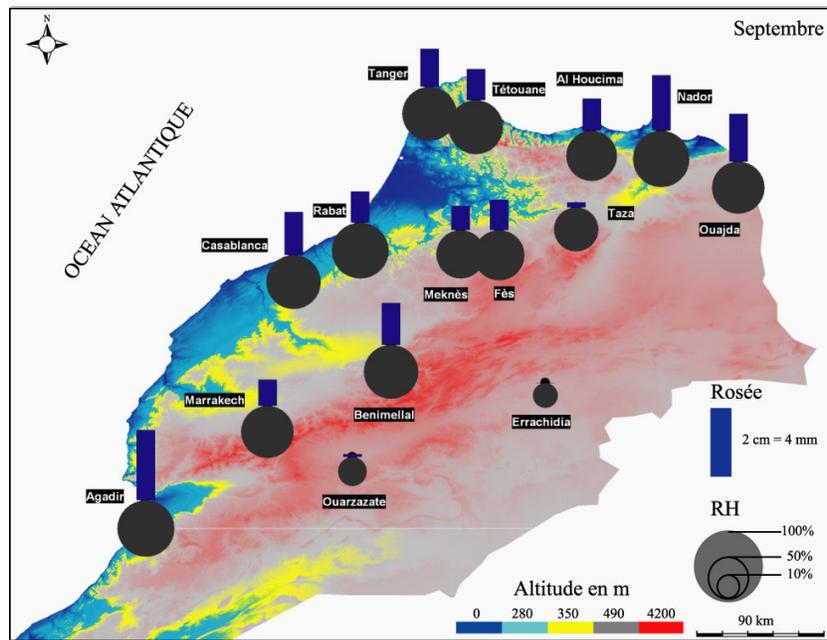


Figure IV.30 : Carte de répartition des rendements moyens de la rosée estimés et de l'humidité relative dans différentes régions du Maroc.

IV.9 Simulation numérique

Les méthodes de calculs numériques en mécanique des fluides (*Computational Fluid Dynamics* (CFD) en anglais) apportent des réponses à des coûts moindres dans un grand nombre de domaines de l'ingénierie. Les méthodes de simulation numériques trouvent plusieurs applications dans les pratiques courantes de la science en raison des principaux avantages qu'ils offrent :

- Réduction du temps et du coût de conception par la réduction du nombre de prototypes réels à expérimenter ;
- Meilleure compréhension des phénomènes, et par conséquent, diagnostic plus sûr des problèmes ;
- Développement de solutions comportant moins de risques, car elles sont expérimentées par simulation plutôt que par des essais en laboratoire ou *in situ*.

Dans son travail de thèse, Clus O. (2007), a simulé numériquement les condenseurs radiatifs avec le logiciel PHOENICS (Code généraliste en CFD). Il a ainsi pu comparer quantitativement l'efficacité thermique de plusieurs systèmes de géométries différentes.

Dans ce travail présent, on a essayé dans le même ordre d'idée de simuler l'écoulement d'air au niveau de notre site d'étude (Station de Mirleft). La modélisation de la station a été réalisée en 3D telle que représentée sur la Figure IV.31. Le but de l'expérience numérique est de comprendre le comportement des 4 condenseurs lorsqu'ils sont soumis à des variations des différents paramètres régissant les échanges, c'est à dire , le rayonnement thermique (ciel clair ou nuageux), la vitesse et la direction du vent. On s'intéresse en particulier à la température de surface T_c le long des condenseurs.

IV.9.1 Le logiciel PHOENICS

PHOENICS est un logiciel commercial CFD développé au Royaume-Uni par la compagnie CHAM Ltd. Il résout les équations différentielles d'évolution pour simuler les écoulements fluides, les transferts de chaleur, les réactions chimiques et autres phénomènes connexes en une, deux ou trois dimensions, en régime transitoire ou permanent. Pour effectuer le calcul numérique, la discrétisation se fait en divisant le domaine en un ensemble de volumes de contrôle finis pour lesquels on détermine la valeur de chacune des variables (pression, température, concentration, vitesses, turbulence) en résolvant l'équation de conservation généralisée :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \nabla \cdot (\rho \bar{V} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (\text{IV. 4})$$

Avec t le temps, ϕ la propriété transportée (T), V le vecteur vitesse, ρ la densité du fluide, Γ le coefficient de diffusion, et S le terme source de la grandeur considérée ϕ par unité de volume.

Cette équation générique est appliquée successivement aux variables dépendantes décrites le tableau VI.9 :

Tableau IV.9 : Présentation des différents termes de l'équation de transport pour la variable ϕ

	ϕ	Γ_ϕ
Continuité	1	0
Moment	u, v, w	μ_e
Température	T	$(\mu_l / \sigma_l + \mu_t / \sigma_T)$
Turbulence	k	$(\mu_l + \mu_t / \sigma_k)$
Dissipation	ε	$(\mu_l + \mu_t / \sigma_\varepsilon)$

Ici μ_l est la viscosité dynamique laminaire, μ_t est la viscosité turbulente et μ_e la viscosité efficace, enfin σ_k et σ_ε sont les coefficients du modèle de turbulence standards.

PHOENICS approche la solution exacte des équations différentielles décrivant la physique du phénomène (transfert de chaleur...) par un processus itératif qui consiste à corriger chacune des variables calculées jusqu'à ce que les distributions obtenues vérifient les équations de base avec un degré d'erreur acceptable. La mesure de cette correction est donnée par la valeur des résidus, pour chacune des variables, à chaque itération. Plus les résidus sont faibles, plus la solution calculée est proche de la solution exacte du système algébrique obtenu.

IV.9.2 Méthodologie

La pertinence de la simulation numérique des écoulements fluides s'appuie sur un choix approprié d'un maillage du modèle géométrique (Figure VI.31). La précision des résultats dépend de la dimension des mailles. La méthode des volumes finis consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre fini de volumes et d'établir sur ces volumes des bilans de masse, de moment et d'énergie. Ceci permet de déduire les températures à la surface des

condenseurs. Dans une première étape, on crée la géométrie générale en définissant les points, les lignes et les différents objets qui sont présent dans le domaine de calcul (murs, condenseurs) et également les objets extérieurs (Entrée, Sortie et Paroi) qui définissent les conditions aux limites du problème considéré.

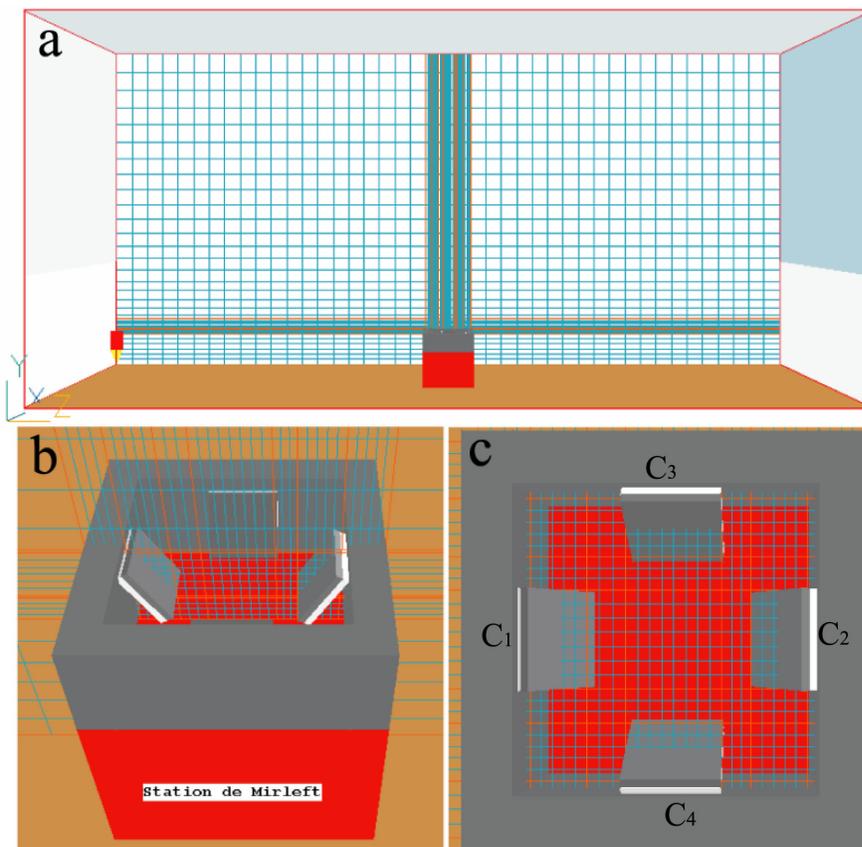


Figure VI.31 : (a) Maillage du domaine d'étude; vue de l'ensemble du domaine (4 condenseurs sur le toit de la station à Mirleft), (b) : vue longitudinal du maillage de la station et (c) : vue transversal du maillage.

IV.9.3 Description des cas simulés

Dans cette section, on donne une brève description des cas simulés avec la version 2008 du PHOENICS en insistant sur leurs points communs qui se résument en :

* La géométrie du domaine d'étude (4 condenseurs sur le toit d'une maison) : 4 parallélépipèdes d'1 m² avec une épaisseur de 0,1 m.

* Un profil de vent de type atmosphérique, choisi avec une quantité de turbulence de l'ordre de 5%. L'écoulement considéré dans le domaine est par conséquent turbulent et résolu par le modèle $k-\epsilon$ standard.

IV.9.3.1 Influence du vent

Le vent est un facteur très important sur les rendements en rosée. Les simulations numériques ont montré (Clus *et al.*, 2006b) que pour $RH = 85 \%$ et $V \geq 3,0 \text{ m s}^{-1}$ l'apport thermique sur un condenseur 1 m^2 standard de type OPUR (face arrière au vent dominant) est suffisamment important pour empêcher la condensation de rosée. Cet ordre de grandeur est confirmé par de nombreuses mesures sur sites (Muselli *et al.*, 2002 ; Beysens *et al.*, 2003 ; Mileta *et al.*, 2004 ; Muselli *et al.*, 2006a). Par CFD on a pu ainsi simuler la trajectoire effectuée par l'air et établir les profils de température (champs thermiques) à la surface de chaque condenseur. Les figure VI.32a et VI.32b présentent les profils de température de surface pour deux configurations différentes concernant la présence ou non des murs (coupe-vent) autour des condenseurs. L'échelle des températures est représentée par des couleurs variant du bleu (basse température) au rouge (haute température).

Au niveau du toit avec des murs (Figure VI.32a), les températures prélevées au niveau de chaque surface différent selon l'emplacement des condenseurs. Celui qui est placé dos à la direction du vent à une température plus faible (C1), par contre celui en face a une température supérieure par rapport aux autres (C3) (Tableau IV.10). Il apparaît que C1 avec vent arrière est le plus favorable à une meilleure condensation, selon Beysens (Beysens *et al.* 2003) et Clus (Clus *et al.* 2006) cette configuration permet d'envisager un gain d'efficacité supérieur à 10% pour un vent de $1,5 \text{ m s}^{-1}$ correspondant au vent moyen durant les événements de rosée. On remarque aussi que T_c varie de manière importante à proximité des extrémités des condenseurs. A cet endroit, l'air se trouve piégé sous l'influence d'un vortex de recirculation. Ce résultat était déjà montré pour des surfaces inclinées (Condenseur de 30 m^2 d'Ajaccio, Muselli, 2002) et l'usine à rosée de Panandhro (Inde) (Clus O., 2007).

Par contre au niveau du toit sans mur (Figure VI.32b), les condenseurs ont des températures supérieures par rapport au premier cas. La géométrie du toit de la station semble être bénéfique pour améliorer le rendement de la rosée. La présence de ces coupe-vents à proximité des condenseurs, se révèle être efficace face aux effets du vent. D'autres études ont été réalisées sur ce sujet et montrent qu'un brise-vent, contrairement à ce que l'on peut croire doit être perméable pour être efficace. En effet, le brise-vent doit avoir une porosité supérieure à 25% pour permettre de conserver un flux laminaire en aval, de direction semblable au vent dominant mais de vitesse réduite (Clus, 2007). Pour une porosité optimum de 35 à 40% (Melaragno, 1982 ; Guyot, 1999) le produit de la réduction moyenne du vent par la longueur de la zone protégée est maximum.

Tableau VI.10 : Influence du vent sur T_c des condenseurs installés sur deux toits différents.

T_c (°C)	Condenseur1	Condenseur2	Condenseur3	Condenseur4
Toit avec murs	12,77	13,43	11,88	12,16
Toit sans mur	13,81	14,10	13,74	14,25

IV.9.3.2 Influence du rayonnement thermique émis par l'atmosphère

Dans cette partie, nous vous proposons d'allons étudier l'influence du rayonnement sur la température de surface des condenseurs (T_c). Pour cela, nous prenons deux cas de l'état du ciel au dessus de la station, un avec une température atmosphérique de -73 °C et le l'autre avec une température de $+ 10$ °C. En général, le rayonnement thermique du ciel vers les condenseurs est un facteur limitant de la condensation de l'humidité atmosphérique. Les résultats obtenus par CFD montrent que la température des condenseurs varie considérablement pour les deux cas simulés (Tableau IV.11).

L'influence du rayonnement du ciel, c'est-à-dire de la couverture nuageuse sur la condensation de rosée a été énoncée au paragraphe précédent, la comparaison entre T_c et la nébulosité montre que T_c augmente avec celle-ci. En effet, le refroidissement radiatif du condenseur est diminué (T_c élevée) par l'effet de serre dû à la couverture nuageuse.

Tableau VI.11 : Influence du rayonnement sur T_c des condenseurs.

T_c (°C)	Condenseur1	Condenseur2	Condenseur3	Condenseur4
Rayonnement (-73°C)	12,77	13,43	11,88	12,16
Rayonnement (10°C)	13,45	13,98	12,89	13,37

Nous avons abordé au cours de cette partie l'étude des champs thermique et dynamique sur les condenseurs. Nous avons procédé à des simulations à l'aide d'un code CFD-PHOENICS basé sur un schéma de discrétisation en volumes finis des équations qui régissent les échanges thermiques. Nous avons simulé numériquement le mouvement de l'air autour de deux types de toits (avec et sans murs) et constaté que la présence de murs autour des condenseurs est favorable pour diminuer le réchauffement des condenseurs par l'effet du vent.

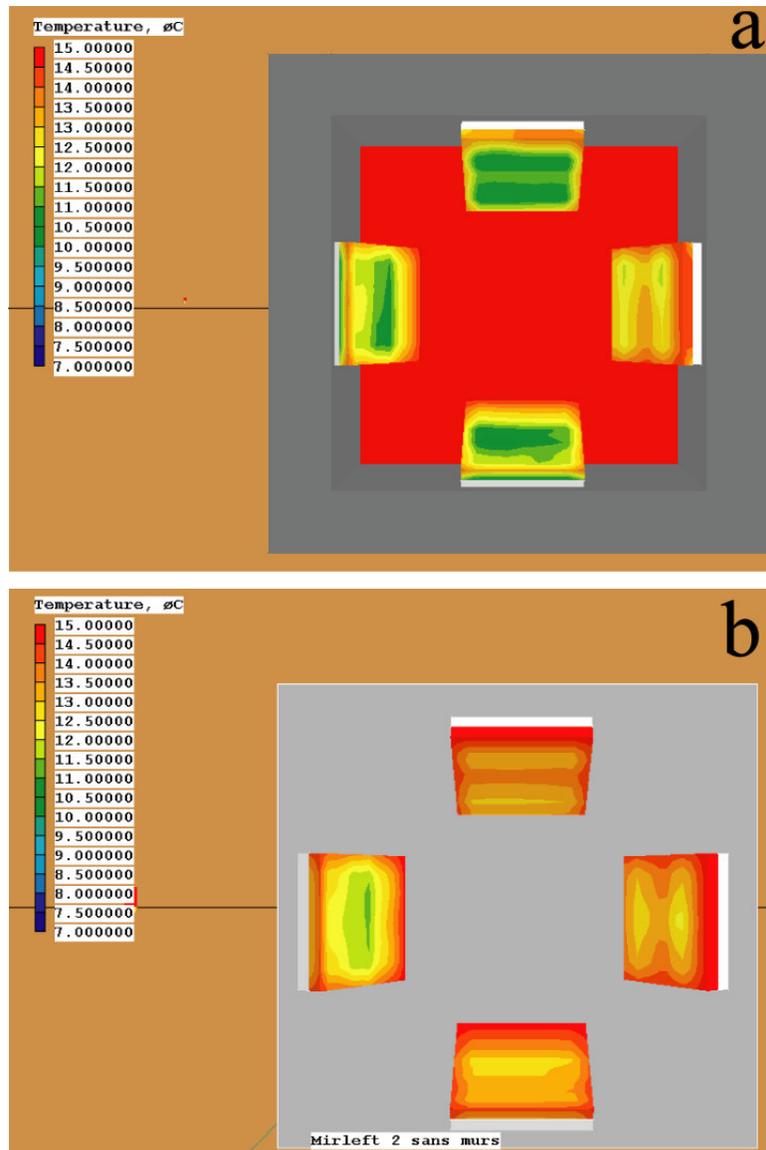


Figure VI.32 : Simulation de l'écoulement de l'air et transfert de chaleur à la surface des 4 condenseurs sur le toit de la station de mesure (Logiciel PHOENICS version 2008). (a) : température de surface pour des condenseurs entourés par le mur (b) et sans mur.

IV.10 Conclusion

L'analyse de données récoltées durant cette période a permis d'étudier l'amplitude de la rosée, de la pluie et, dans une moindre mesure, celle du brouillard dans la région de Mirleft. La quantité de rosée cumulée pour les 12 mois de mesure est 18.85 mm, à comparer à la pluie 48.65 mm. Pour le brouillard, 20 événements ont été signalés durant cette période d'étude, avec 7 événements significatifs donnant 1.41 mm. Pour Idhouasksou 7.075 mm de rosée on été mesurés et 6,500 mm de brouillard seulement durant 3 mois. Le volume de ces eaux représente presque 40% de l'apport annuel en pluie et apparaît donc une composante essentielle de l'apport hydrique.

Ce chapitre nous a permis de cerner les relations entre les paramètres climatiques et le phénomène de la condensation de la vapeur d'eau.

Nous avons préconisé dans ce travail un ensemble de techniques statistiques permettant des analyses ciblées pour concevoir des relations entre les paramètres climatiques (ACP), d'autant plus que nous avons pu faire ressortir les particularités des conditions de la formation de la rosée. Ces analyses permettent d'identifier des séquences climatiques caractéristiques de la rosée et leur évolution durant cette année d'étude.

L'ACP est utilisée comme étape préalable à la classification pour deux raisons : pour son pouvoir de description et son pouvoir de filtrage qui devrait permettre de travailler sur des coordonnées factorielles moins nombreuses que les variables de départ. L'apport de la classification hiérarchique ascendante est une opération complémentaire de l'analyse en composante principale. La typologie se sert de cette méthode pour fournir une autre forme de synthèse des données. Les individus qui se ressemblent au niveau des variables actives sont rassemblés dans une même classe. Les classes sont calculées pour que, lorsque l'on passe d'une classe à une autre, on passe d'une catégorie particulière d'individus à une catégorie différente. Les nuits avec rosée ont une grande corrélation avec l'humidité atmosphérique, et les nuits sans rosée semblent très liées à un état du ciel nuageux et à des fortes vitesses du vent. La logique est donc respectée.

Nous disposons aussi dans ce chapitre d'un ensemble de modèles linéaire, polynomial et réseau de neurone pour estimer le rendement de la rosée. A ce sujet, une étude de l'équipe française (OPUR) a élaboré un modèle physique se basant uniquement sur quelques paramètres climatiques concernant et testé sur une dizaine de région du monde, incluant les régions tropicales, où notre équipe a mené des recherches sur ce phénomène.

Par ailleurs, cette modélisation nous a aidé à déterminer la rosée dans une quinzaine de sites au Maroc. Une analyse spatio-temporelle du rendement de la rosée et de l'humidité relative a permis une meilleure connaissance du phénomène de la condensation à l'échelle du pays. De plus, les résultats de nos recherches permettent de constater que ces paramètres changent durant les mois étudiés et on peut parler d'une relative originalité régionale.

Dans le but de déterminer la qualité de l'eau de rosée récoltée à Mirleft par rapport à celle d'autres régions dans le monde (Croatie, Bordeaux et Ajaccio), une étude chimique et biologique a été réalisée. Le chapitre qui suit, présente les analyses effectuées et les résultats obtenus.

V.1 Introduction

Lors de la condensation de la vapeur atmosphérique sous forme de pluie ou de rosée, l'eau dissout des minéraux (aérosols), se sature et précipite d'autres minéraux. Par suite, elle acquiert une composition chimique qui est le résultat de ses interactions avec l'atmosphère, et l'influence qui est fonction de facteurs externes naturels ou anthropiques.

L'eau joue donc deux rôles complémentaires : (Bakalowicz, 1979)

- ❖ Réactif chimique qui dissout les minéraux et les matières organiques.
- ❖ Agent transporteur d'énergie et de matière.

L'analyse physico-chimique de la rosée nous renseigne sur la qualité de l'eau issue de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Ce phénomène est dû au refroidissement radiatif à la surface d'un condenseur constitué d'un Foil spécifique produit par l'association OPUR.

La composition de cette eau est enrichie par la dissolution des gaz environnants et des petites particules qui se déposent sur la surface du condenseur (Beysens et al, 2006). Comparée aux études physiques et météorologiques, la qualité de l'eau de rosée a été l'objet de peu de recherches (Pierson et al (1986), Mulawa et al (1986), Okochi et al (1996), Pierson et al (1988), Pierson et Brachaczek (1990), Sceller (2003)). Des analyses chimiques ont été réalisées dans quelques régions du globe, au Chili (Rubio et al, 2002), au USA (Mulawa et al, 1986), au Japon (Chiwa et al, 2003) et en Jordanie (Jiries, 2001), dont les caractéristiques étaient différentes. L'eau de la rosée est très corrosive au Chili avec une concentration ionique élevée, très acide au Japon avec une haute concentration des sulfates et des nitrates, et légèrement alcaline et faiblement minéralisée en Jordanie. En Corse, les caractéristiques de la rosée sont comparables à celles de la Jordanie avec une alcalinité plus forte (Muselli et al, 2002, 2006b). Une étude sur une année de la chimie et de la bactériologie de la rosée effectuées à Ajaccio (Muselli et al, 2002, 2006b) et Bordeaux (Beysens et al, 2005) a permis de caractériser la qualité de l'eau de rosée.

Dans ce travail, on présente une étude de comparaison de la composition chimique de l'eau de rosée et de l'eau de pluie récoltées dans la région de Mirleft au Sud Ouest du Maroc. La comparaison entre ces sources nous donne une idée sur l'influence possible du substrat de condensation et de la contribution potentielle des aérosols atmosphériques. Dans cette période, les mesures ont été effectuées sur 28 événements de rosée et 9 événements de pluie. La conductivité électrique EC et le pH ont été mesurés immédiatement à la fin de chaque prélèvement. Les anions majeurs (Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- et SO_4) et les cations majeurs (K^+ , Mg^{2+} ,

Na⁺ et Ca²⁺) ont été analysés au Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST) dans les laboratoires de l'Unité d'Appui Technique à la Recherche Scientifique (UATRS) de Rabat.

Les données présentées dans ce chapitre sont issues des campagnes de prélèvements réalisées de mai 2007 à avril 2008.

Nous avons choisi de considérer tout d'abord les paramètres physico-chimiques mesurés un à un afin de les comparer à ceux publiés dans d'autres travaux de recherches pour discerner leur comportement vis-à-vis de la position géographique et de certains paramètres tels que la vitesse et la direction du vent, puis d'utiliser des analyses multidimensionnelles dont l'Analyse en Composantes Principales (ACP) afin de déterminer les groupements d'éléments chimiques et leurs origines probables.

Nous pouvons aussi remarquer que les résultats présentés dans cette partie ont un intérêt dans le cadre de la caractérisation du site prospecté qui montre qu'il se trouve dans une zone où les activités anthropiques sont limitées (exploitation de la rosée envisageable).

V.2 Description des données

Tous les minéraux sont plus ou moins solubles dans l'eau. Cette solubilité n'est pas identique pour tous les minéraux. Elle dépend de la nature du minéral, de variables physiques (température et pression) et de la composition chimique du solvant (l'eau).

Le temps joue un rôle principal dans les processus de dissolution ; l'acquisition de la minéralisation d'une eau n'est pas instantanée : plus le contact avec la surface de condensation ou la roche est long et plus l'eau a le temps de dissoudre et de se minéraliser. Les activités anthropiques peuvent également constituer un apport d'éléments importants dans la composition chimique de l'eau.

En général, une partie de la minéralisation de l'eau de rosée et de pluie dépend de facteurs externes naturels comme les aérosols (sels marins et poussières continentales) et des facteurs anthropiques dont les plus importants sont la pollution industrielle enrichissant l'air en NO_3^- et SO_4^{2-} (responsable des pluies acides anthropiques), des produits chimiques comme le plomb et les hydrocarbures.

V.2.1 Caractéristiques géochimiques de l'eau de rosée et de pluie

Les prélèvements de l'eau de la rosée et de la pluie sont caractérisés par les variables suivantes : température (T), pH, conductivité, calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), nitrates (NO_3^-), la fraction du sel de mer (Sea-salt fraction ; SSF) et le facteur de neutralisation (NF). Devant le nombre important de variables et de données ainsi recueillies, nous avons eu recours, pour l'interprétation, à l'analyse en composantes principales. Cette méthode de traitement est bien connue pour une description objective des tableaux de données ; elle permet une mise en évidence de facteurs à l'origine de l'évolution des variables et de leurs relations.

V.2.2 Les analyses statistiques

Les concentrations chimiques dans les eaux de rosée et de pluie sont variables dans le temps et dans l'espace en relation directe avec l'environnement et les conditions climatiques. Le nombre de variables est trop grand pour pouvoir faire une synthèse facile des données. Les analyses faites par la statistique élémentaire et les analyses factorielles permettent d'observer les variations et les relations entre les différentes variables et objets ou échantillons. Plusieurs méthodes sont bien adaptées aux données chimiques, on a utilisé le logiciel Statistica 6.0 pour effectuer une Analyse en Composantes Principales (ACP).

Depuis les années 1980, les analyses par l'ACP sont de plus en plus utilisées en écologie aquatique car ces méthodes se révèlent être des outils utiles pour identifier les paramètres importants pour la gestion des eaux de surface. De nombreuses études ont récemment été menées afin de trouver les paramètres physico-chimiques les plus pertinents pour estimer la qualité des eaux, visualiser son évolution au cours du temps et organiser la gestion de l'eau. L'ACP est aussi couramment utilisée dans les études prenant en compte à la fois l'influence des facteurs climatiques et des facteurs anthropiques sur l'eau de pluie afin de distinguer par exemple, l'origine de certains paramètres chimiques (Zhang et al 2007, Báez et al 2006, Báez et al 2007, Cecilia et al 2007).

V.2.3 Validité des données de terrain (balance ionique)

La balance ionique est un moyen de détecter la majorité des erreurs commises. L'erreur sur la balance ionique est donnée en pourcentage par la formule suivante :

$$\text{Balance ionique (BI)} = 100 * (\text{SA} - \text{SC}) / (\text{SA} + \text{SC}) \quad (\text{V.1})$$

Où : SA = somme des anions, et SC = somme des cations

Si BI n'appartient pas à l'intervalle (-5%, +5%), l'analyse est entachée d'une trop forte erreur et l'échantillon n'est pas gardé.

Le bilan ionique a été calculé pour tous les échantillons analysés. Le bilan obtenu sur chacun de ces échantillons a rarement excédé 4%. Toutes les données peuvent donc être prises en considération à part quelques échantillons (3 échantillons) dont la BI est supérieure à 5%.

V.2.4 Les éléments caractéristiques de la rosée et de la pluie

Mg^{2+} : les eaux de pluies sont pauvres en Mg^{2+} . Il provient de la dissolution des dolomies et de calcaires dolomitiques. La présence du magnésium indique généralement des eaux à transit lent (Bakalowicz, 1994). Il vient aussi des embruns marins.

Na^+ , K^+ , Cl^- : leur concentration est généralement variable dans les eaux de condensation et ils proviennent :

* Des précipitations : c'est le principal apport par lessivage des aérosols marins ; trois facteurs sont à prendre en compte : *l'éloignement du littoral, l'origine des précipitations, et la dilution*

* De la dissolution des formations évaporitiques : absentes dans la région de Mirleft.

* D'une reconcentration : plusieurs phénomènes d'origine chimique, biologique ou climatique, peuvent influencer sur la concentration des ions Na^+ , K^+ et Cl^- .

SO_4^{2-} : la variabilité des concentrations en SO_4^{2-} dans les eaux est liée à différents mécanismes :

* Eaux de pluies : les eaux de pluies contiennent des quantités non négligeables de SO_4^{2-} . Il provient de l'oxydation du soufre dans l'atmosphère qui se trouve en abondance dans les zones industrielles. Cette oxydation est responsable des pluies acides.

* Apport dû à l'encaissant : la dissolution de roches évaporitiques fournit des sulfates aux eaux souterraines.

* Origine agricole : les scories potassiques et certains phosphates utilisés comme engrais peuvent apporter des sulfates.

NO_3^- : sa présence est généralement associée à l'agriculture ; c'est le meilleur signe de pollution d'origine agricole. Les nitrates proviennent également des eaux usées domestiques non traitées. Dans notre étude, son origine probable se trouve dans les excréments des insectes, oiseaux ou petits mammifères venant s'abreuver en eau de rosée au condenseur.

V.3 Synthèse des analyses faites sur la rosée et la pluie

Les tableaux V.1 et V.2 récapitulent les compositions chimiques moyennes, maximales et minimales des événements de rosée et de pluie depuis le 01/05/2007 jusqu'à le 31/04/2008. Il se dégage un certain nombre d'informations générales sur l'analyse physico-chimique des eaux du secteur d'étude. La lame d'eau précipitée (Pluie) pendant cette période à Mirleft a été de 48.65 mm. L'année hydrologique 2007 est une année faiblement pluvieuse. Alors que la quantité de rosée et de brouillard récolée sont respectivement 18.85 mm et 1.41 mm.

V.3.1 Analyse physico-chimique

L'analyse statistique des éléments caractéristiques de l'eau de rosée et de pluie a été calculée et présentée dans les Tableaux V.1 et V.2. L'analyse physico-chimique montre que la nature de ces eaux est alcaline et la conductivité moyenne ne dépasse pas 727.85 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (± 678.64) pour la rosée et 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (± 306.07) pour la pluie. Les éléments majeurs analysés sont : calcium, magnésium, sodium et potassium pour les cations ; chlorures, sulfates et nitrates pour les anions. Les concentrations de ces différents ions montrent la dominance du Cl^- par rapport aux autres éléments. Pour le plomb, le cuivre et le zinc, ils se trouvent en faible quantité dans ces eaux.

V.3.2 Le pH de la rosée et de la pluie

Le pH de la rosée prend une évolution qui varie durant la période d'étude, il prend des valeurs comprises entre 6,75 et 7,93 (Figure V.1). Les mêmes variations périodiques sont observées pour le pH de la pluie mais dans l'intervalle [6,49 - 7,17]. Ces variations sont dues aux différences de quantité d'eau récoltée pour chaque saison, les faibles volumes ayant un pH plus élevé (Figure V.2). Cependant, le volume d'eau ne peut pas complètement expliquer ces variations du pH qui sont liées à la concentration des gaz et des particules suspendues dans l'air. Le faible pH de la pluie par rapport à celui de la rosée (Figure V.3) peut être expliqué par les proportions différentes en éléments chimiques des deux types de précipitations qui sont dues aux variations dans la composition atmosphérique en aérosols et en gaz entre les hautes et les basses altitudes (Wagner al, 1992 in Jiries, 2001). Sur la surface du condenseur, l'eau de rosée dissout les particules dérivées des sols alcalins. Ainsi, plus le taux de condensation est intense (volume élevé), plus ces substances seront diluées et par conséquent, la neutralisation des gaz (NO_x , SO_x) responsables de l'acidité de l'eau sera abaissée. De plus, les variations saisonnières des pH (rosée et pluie) signifient que le volume ne peut être la seule variable (Beysens et al ; 2005). Le pH évolue suite aux contaminations d'espèces acides et aérosols alcalins ; ces composantes atmosphériques sont influencées par les activités anthropiques, les conditions climatiques (vitesse et direction du vent) ainsi que les événements de pluie précédents qui dégagent les aérosols de l'air avant les mesures (Ali et al ; 2004).

Tableau V.1 : Différentes propriétés physico-chimiques de la rosée

	Moyenne	Min	Max	Ecart type
pH in situ	7,40	6,75	7,93	0,27
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	727,25	38,6	2680	678,64
Ca^{2+} mg/l	48,27	16,65	108,18	24
Na^{+} mg/l	99,27	17,65	287,91	112,78
Mg^{2+} mg/l	16,19	4,3	38,09	11,75
K^{+} mg/l	9,50	1,81	18,65	5,42
Cl^{-} mg/l	255,52	60,84	571,05	209,8
SO_4^{2-} mg/l	18,34	5,54	54,13	13,63
NO_3^{-} mg/l	14,90	5,43	28,79	8,71
Cu mg/l	0,018	0,001	0,033	0,01
Pb mg/l	0,005	0,004	0,008	0,001
Zn mg/l	0,022	0,001	0,147	18,94
CFU ml ⁻¹ , 20 °C	170	160	180	
CFU ml ⁻¹ , 37 °C	340	280	400	

Tableau V.2 : Différentes propriétés physico-chimiques de la pluie.

	Moyenne	Min	Max	Ecart type
pH in situ	6,89	6,49	7,17	0,22
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	316	14,50	1081	306,07
Ca^{2+} mg/l	30,86	7,38	50,61	14,04
Na^{+} mg/l	68,76	6,10	188,43	74,29
Mg^{2+} mg/l	10,34	1,38	26,75	8,76
K^{+} mg/l	5,12	0,71	9,68	3,16
Cl^{-} mg/l	147,05	24,79	386,81	118,51
SO_4^{2-} mg/l	16,85	1,24	47,77	14,15
NO_3^{-} mg/l	7,73	0	24,47	8,49
Cu mg/l	0,018	0,002	0,022	0,007
Pb mg/l	0,017	0,004	0,01	0,032
Zn mg/l	0,006	0,003	0,01	7,26

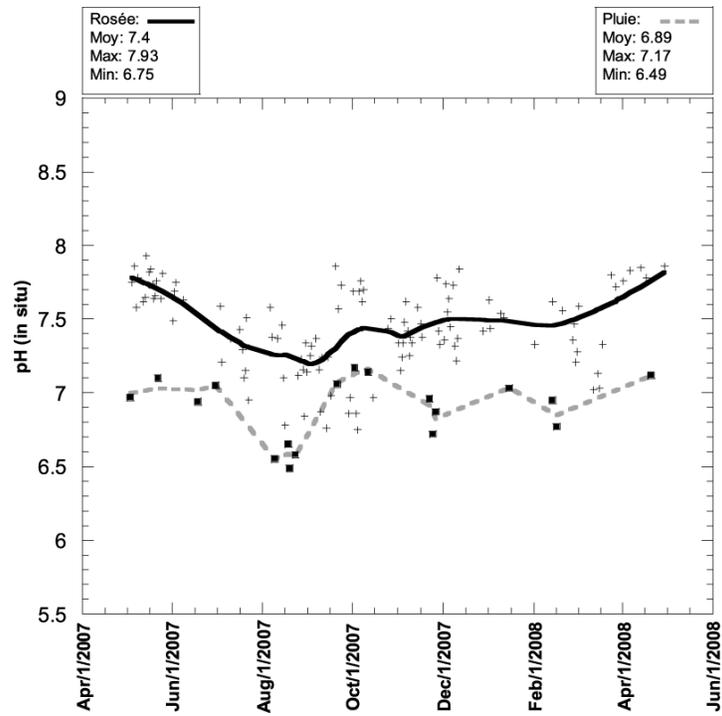
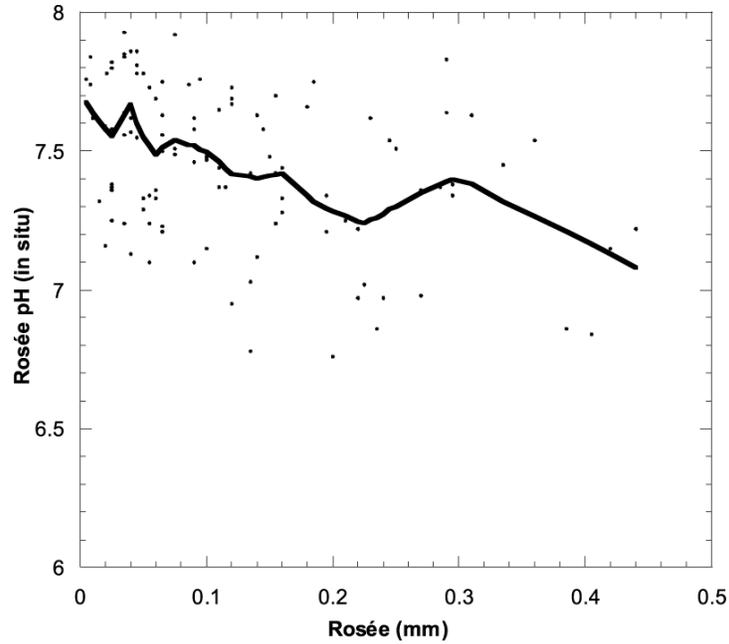


Figure V.1 : Evolution du pH de la rosée et de la pluie pendant la période d'étude.



FigureV.2 : Evolution du pH en fonction du volume de l'eau de rosée récoltée.

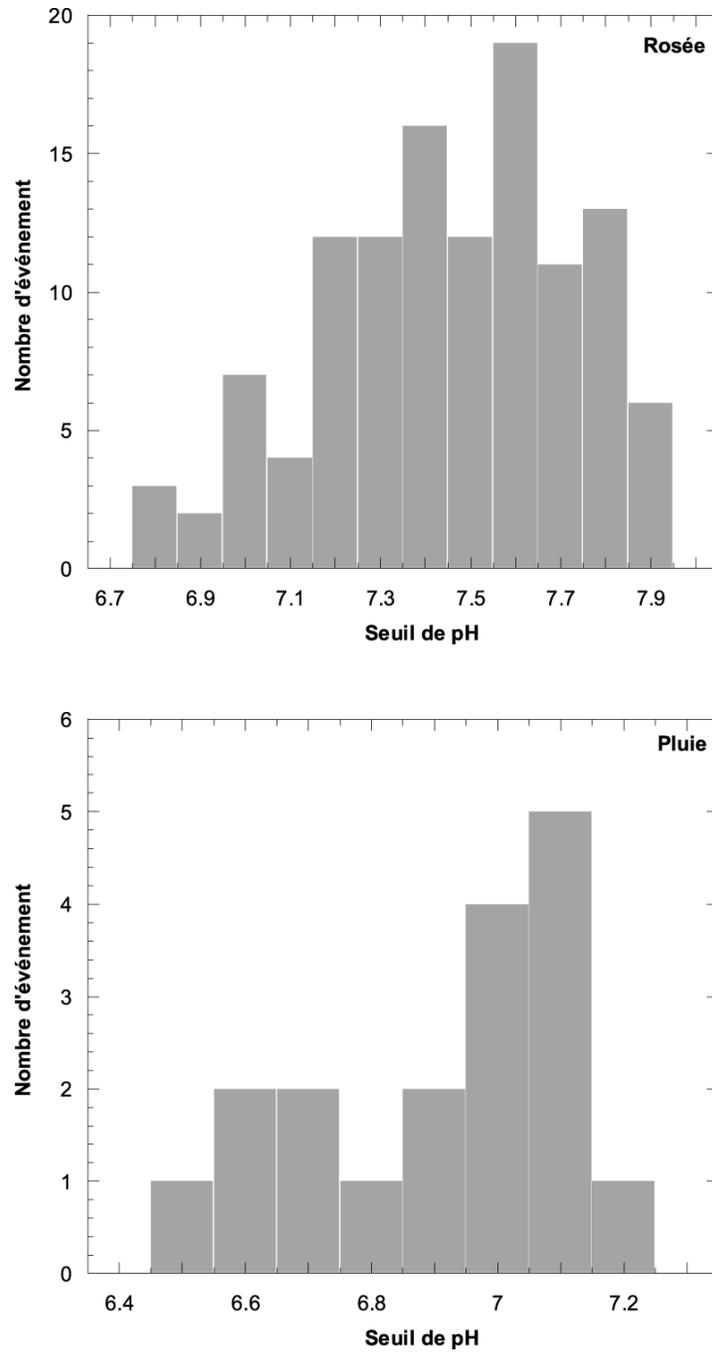


Figure V.3 : Comparaison entre la distribution du pH de la rosée et de pluie (histogramme).

V.3.3 La conductivité de rosée et de pluie

La conductivité électrique de la rosée pendant toute la période d'étude prend des valeurs allant de 38.6 $\mu\text{S/cm}$ jusqu'à 2680 $\mu\text{S/cm}$ avec une moyenne de 725.25 $\mu\text{S/cm}$ (\pm 678.64 $\mu\text{S/cm}$) par contre celle de la pluie s'étend de 14,5 $\mu\text{S/cm}$ à 1081 $\mu\text{S/cm}$ avec une moyenne de 316 $\mu\text{S/cm}$ (\pm 306,07 $\mu\text{S/cm}$). On remarque que la conductivité de la rosée présente des variations temporelles plus importantes que celles observées pour la pluie, les grandes valeurs se concentrent dans les mois de mai, juin, juillet et août (saison sèche) (Figure V.4). Comme le pH, la conductivité électrique diminue avec les volumes élevés, en accord avec la dissolution des gaz et des particules déposées sur la surface du condenseur (Figure V.5) (Beysens et al., 2006, Ali et al., 2004, Das et al., 2005).

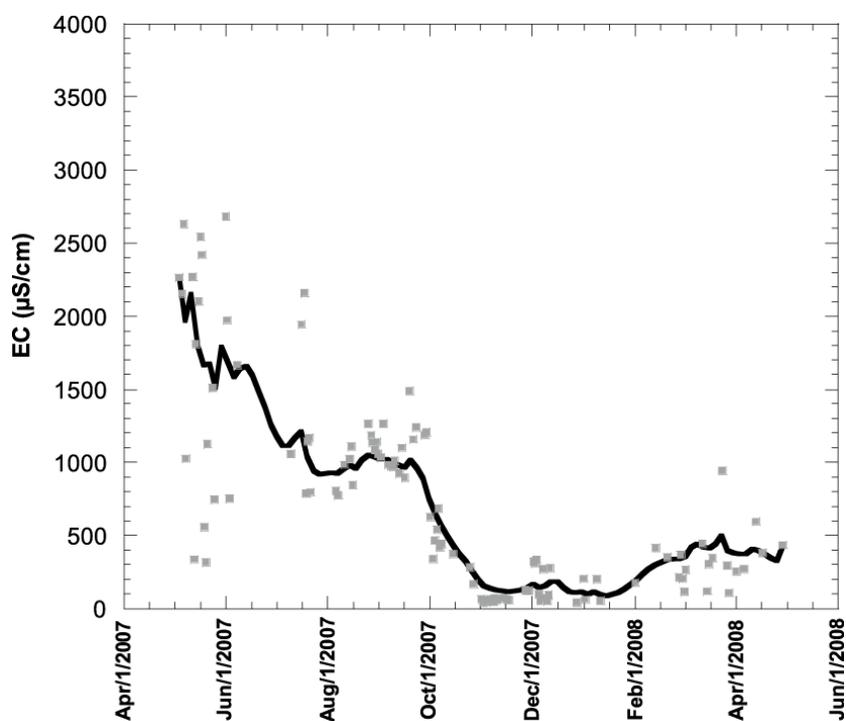


Figure V.4 : Evolution de la conductivité électrique de la rosée pendant la période d'étude.

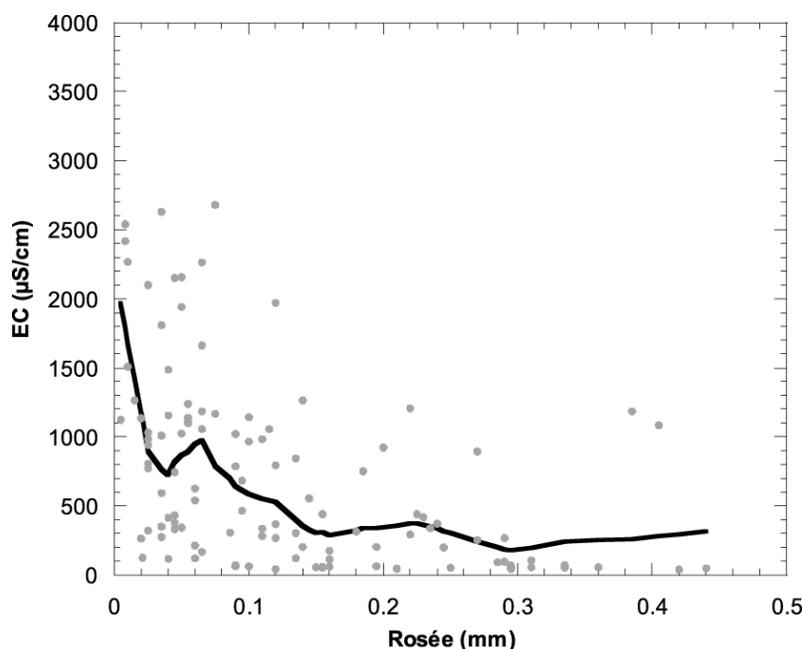


Figure V.5 : Influence du volume de la rosée sur la conductivité électrique.

V.3.4 La concentration ionique de l'eau de rosée et de pluie

Les concentrations ioniques moyennes (en mEq/L) des espèces chimiques majeures obtenues par l'analyse de l'eau de rosée et de pluie pour la période d'étude sont présentées dans la Figure V.6. Dans la rosée, les cations se concentrent de manières différentes, ils prennent l'évolution suivante ; $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, pour la concentration des anions : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$. La comparaison de la chimie des deux eaux montre que la rosée est plus riche en Ca^{2+} , K^+ et SO_4^{2-} que la pluie ou Na^+ et Cl^- sont dominants. Dans l'eau de pluie, les concentrations des ions évoluent de la même façon pendant toute la période d'étude. Les sources probables du Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ sont les poussières du sol suspendues dans la couche inférieure de l'atmosphère mais aussi les particules du milieu environnant amenées à la surface du condenseur par le vent. Les présences élevées du Cl^- et Na^+ sont principalement dues aux sels marins qui sont drainés aux alentours du site d'étude qui se trouve à 200 m de la côte. Les valeurs moyennes du pH de l'eau de rosée et de pluie (respectivement 7,4 et 6,85) sont supérieures au pH (5,6) de la vapeur d'eau en équilibre avec le CO_2 atmosphérique. Cette alcalinité est due aux faibles teneurs en acides sulfuriques (SO_4^{2-}) et nitriques (NO_3^-) qui contribuent à l'acidité de l'eau et aux fortes concentrations cationiques ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) responsables de la neutralisation de ces anions. Ainsi le rapport $(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ ou TA/TC peut être considéré comme indicateur d'acidité. Si TA/TC est inférieur à 1, il

indique la nature alcaline de l'eau et s'il est supérieur, il indique la présence des anions libres responsable du pH faible. La chimie de la rosée et de la pluie montre qu'elle est beaucoup plus riche en éléments que celle d'autres régions (Bordeaux), cette différence est due aux fortes contributions des apports désertiques qui caractérisent la région d'étude (Tableau V.3). Elle est à noter que cette composition chimique respecte les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé OMS sauf pour le Cl^- , Mg^{2+} . Pour le Zn, on a enregistré deux valeurs élevées dues à l'utilisation des plaques galvanisées au lieu du foil, ce qui montre l'influence de la surface de collecte sur la chimie de l'eau de rosée et de pluie.

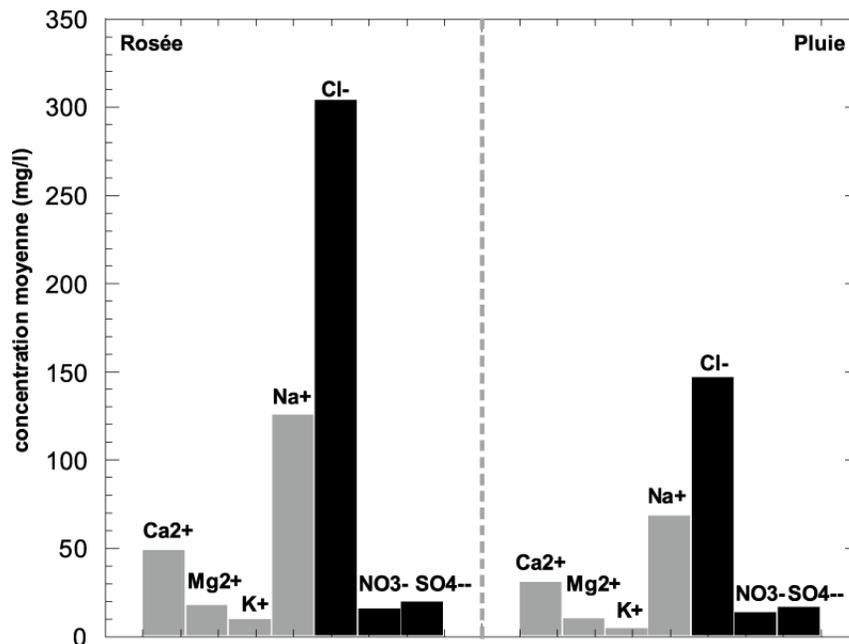


Figure V.6 : Caractérisation de la chimie de l'eau de rosée et de pluie dans la région de Mirleft.

Tableau V.3 : La chimie de l'eau de rosée à Mirleft comparée avec celle de pluie, WHO et l'eau de rosée d'un autre littoral océanique (Bordeaux, France).

	Rosée 2007-2008	Pluie 2007-2008	Max WHO	Rosée (Bordeaux)
pH in situ	7.4	6,89	9.5	6.26
EC (µS/cm)	727.25	316		45.1
MT mg/L *	560	230		35
Ca²⁺ mg/L	48.94	30.86		1.47
Na⁺ mg/L	125.94	68.76	200	3.6
Mg²⁺ mg/L	17.97	10.34	0.5	0.36
K⁺ mg/L	10.08	5.12		0.41
Cl⁻ mg/L	304	147.05	250	5.52
SO₄²⁻ mg/L	20.1	16.85	500	3.75
NO₃⁻ mg/L	7.1	7.73	40	2.8
TA/TC	0.4		0.47	

* MT mg/L : Minéralisation totale

V.4 Variations temporelles des concentrations ioniques

Le Tableau V.4 met en évidence des écarts importants entre les valeurs extrêmes (minimum - maximum) de concentration relevées pour chaque élément. L'étude de ces écarts entre extremum est utilisée pour l'interprétation des variations temporelles élémentaires. L'écart relatif entre les valeurs extrêmes de concentration est calculé sous forme de pourcentage, selon l'équation V.2.

$$\text{Ecart \%} = 100 \times (C_{\max} - C_{\min}/C_{\min}) \quad (\text{V.2})$$

Où C_{\max} est la concentration maximale et C_{\min} la concentration minimale.

Tableau V.4 : Ecart relatif en pourcent entre les extremums des concentrations.

Eléments	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cu	Pb
% Rosée	550	786	929	1763	1889	430	876	3200	100
% Puie	586	1836	1260	2986	1460	652	3752	806	2375

Quelle que soit la fraction considérée, les pourcentages obtenus oscillent entre 100 % pour le Pb et 3752 % pour le SO_4^{2-} , ce qui traduit une forte hétérogénéité des résultats. En prenant comme borne de classement une valeur d'écart relatif de 100 %, qui équivaut à un rapport $C_{\text{max}}/C_{\text{min}} = 2$, il est possible de distinguer que tous les éléments chimiques de la rosée et de pluie sont hautement variables (Ecart > 100 %).

En considérant la rosée, seul le plomb (Pb) dispose d'une valeur d'écart égale à 100 %. De plus, les pourcentages calculés pour la rosée sont tous inférieurs aux taux relevés pour la pluie à l'exception de Cl^- et Cu.

Suivant les éléments de chaque ressource, l'amplitude entre les teneurs extrêmes met en évidence l'existence de variations temporelles plus ou moins marquées. Cette approche reflète les écarts de concentration pouvant exister au fil du temps mais ne renseigne pas sur le comportement dans le temps. Il est de fait nécessaire de déterminer pour ces éléments chimiques et ceci en fonction du type de la ressource considérée, si ces variations de concentration sont significatives, et si elles se produisent aléatoirement, au fil du temps, ou sur des périodes définies de l'année telles que les saisons.

V.4.1 Variations mensuelles

➤ L'eau de rosée

La variation des concentrations moyennes mensuelles des ions inorganiques majeurs dans l'eau de rosée est représentée dans la Figure V.7. Les concentrations varient de mois en mois pour la plupart des ions. Il est clair que les plus hautes concentrations de tous les ions ont été observées pendant les mois de Juin et Février. Les vitesses les plus élevées du vent pendant l'été ont tendance à augmenter l'émission des particules de sources terrestres. En plus, la rareté des pluies pendant une saison sèche permet aux aérosols de séjourner plus longtemps dans l'atmosphère.

Il est aussi intéressant de comparer des concentrations des ions en février, juin et avec ceux d'octobre, novembre et décembre. Le volume total de la rosée en Juin et Février est 1.34 mm comparé à 8.106 mm en Octobre, Novembre et Décembre. En effet, les grands volumes ont de faibles concentrations en éléments chimiques du fait de la grande dilution.

Dans la plupart des échantillons, le comportement temporel de Ca^{2+} est en rapport avec le pH, ceci s'explique par l'incorporation des particules de la poussière dans les gouttes de rosée qui s'est accompagnée d'une forte augmentation du Ca^{2+} dissous et du pH. De la même façon, les concentrations élevées de Ca^{++} sont aussi associées avec les hautes concentrations

de Mg^{2+} , SO_4^{2-} et NO_3^- . Ces observations suggèrent que les sources terrestres ont influencé la composition ionique de l'eau échantillonnée et l'acidité de la rosée et de la pluie s'est probablement neutralisée par Ca^{2+} et Mg^{2+} . On remarque dans ces échantillons, la même évolution temporelle pour le Cl^- et le Na^+ qui proviennent probablement de la même source (NaCl marin).

➤ **L'eau de pluie**

La figure V.8 récapitule l'évolution temporelle des éléments chimiques de quelques épisodes pluvieux de l'année d'étude. Toutes les précipitations ont été prélevées et analysées, sauf des épisodes où on n'a pas pu collecté ces échantillons (50% des données).

La hauteur d'eau précipitée pendant cette période à Mirleft est de 48.65 mm. Cette année était une année faiblement pluvieuse. Les pluies les plus concentrées en éléments dissous sont les premières pluies, mais aussi celles qui arrivent en fin de saison de pluie. Les premières sont riches en poussières et aérosols accumulés pendant toute la saison sèche dans l'atmosphère, les autres sont riches en poussières car elles ont lieu après les vents chauds provenant du désert et chargés en poussières.

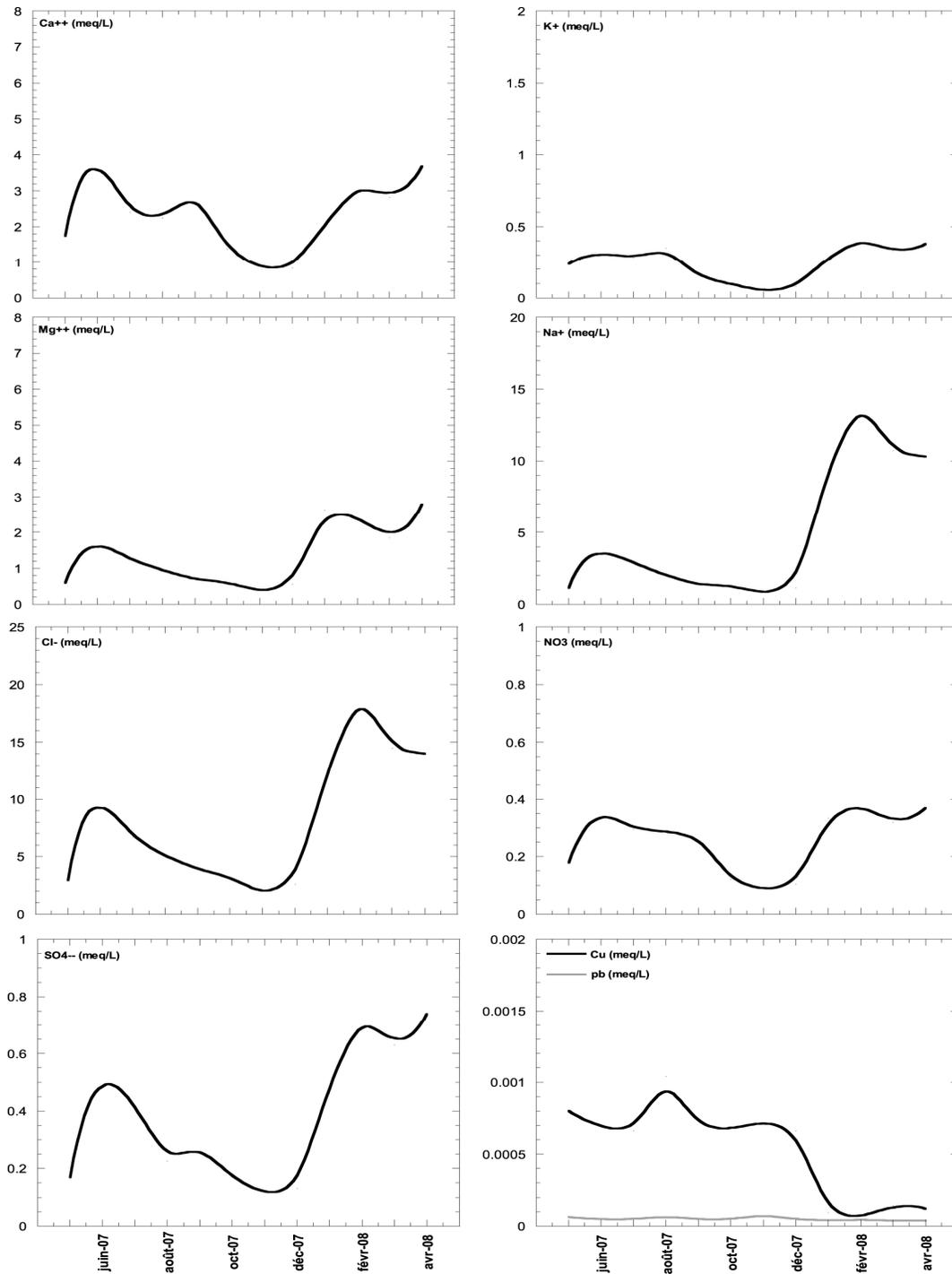


Figure V.7 : Variation temporelle des ions dans l'eau de rosée (unité : meq/L).

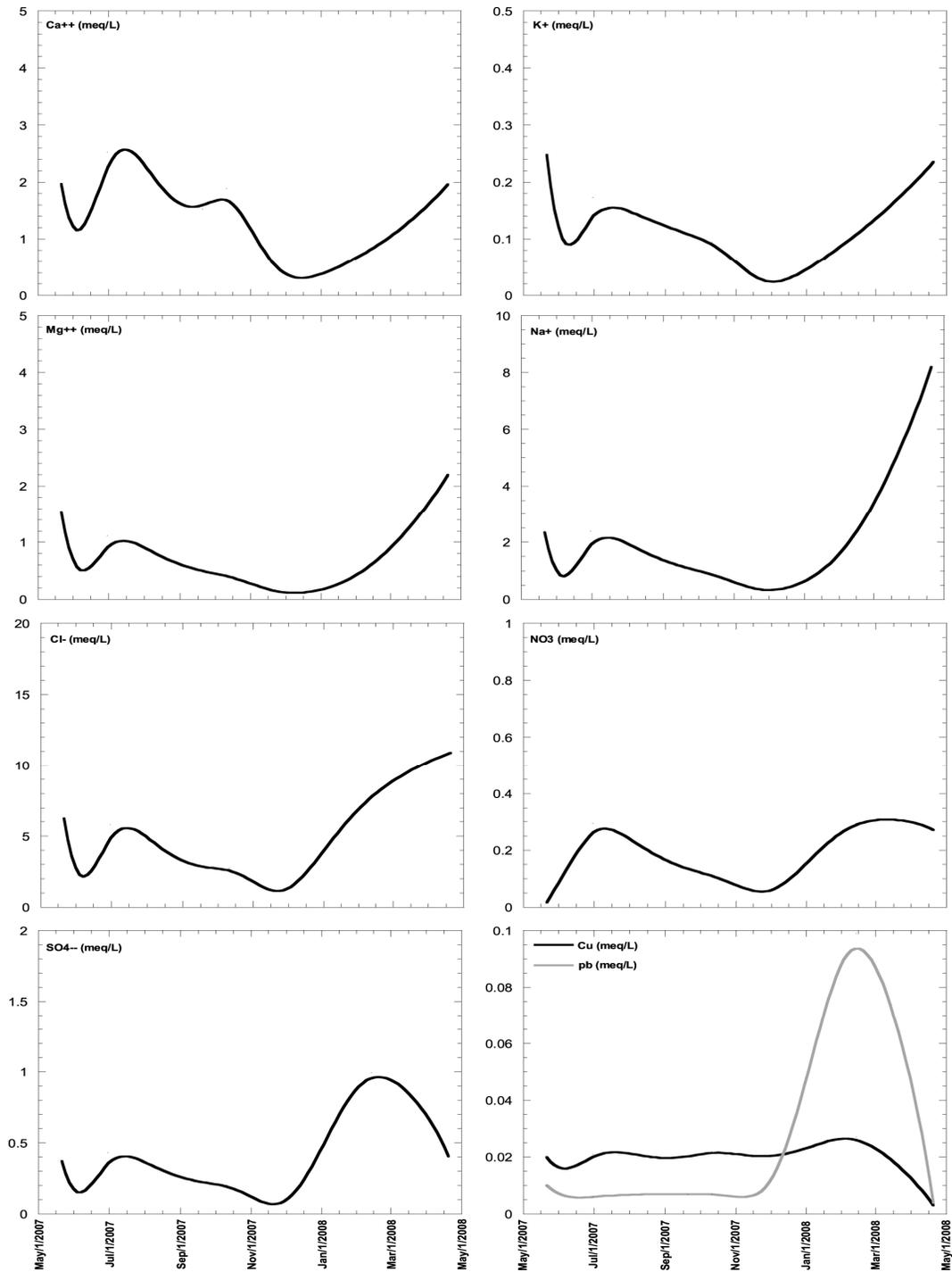


Figure V.8 : Variation temporelle des ions dans l'eau de pluie (unité : meq/l).

V.4.2 Variations saisonnières

La variation des concentrations saisonnières des ions inorganiques majeurs dans l'eau de rosée est représentée dans la Figure V.9. Il est clair que les plus hautes concentrations de tous les ions ont été observés pendant les mois de Juin et Février. Les vitesses les plus élevées du vent pendant l'été ont tendance à augmenter l'émission des particules de sources terrestres. En plus, la rareté des pluies pendant une saison sèche a permis aux aérosols de plus longtemps dans l'atmosphère. Par contre dans la saison humide, les précipitations et le climat froid qui règnent dans la région ont tendance à minimiser les concentrations en éléments chimiques. Ceci peut s'expliquer d'une part par la mobilisation minimale des particules des formations superficielles dont les sols sont humides et couverts de végétation, et d'autre part par une concentration faible en poussières dans l'atmosphère par suite de son lessivage par la pluie. Il est aussi intéressant de comparer les concentrations des ions par rapport aux saisons. Le volume total de la rosée en saison sèche est 3,11 mm comparé à 6,11 mm en saison de transition et 9,63 en saison humide (Tableau V.5).

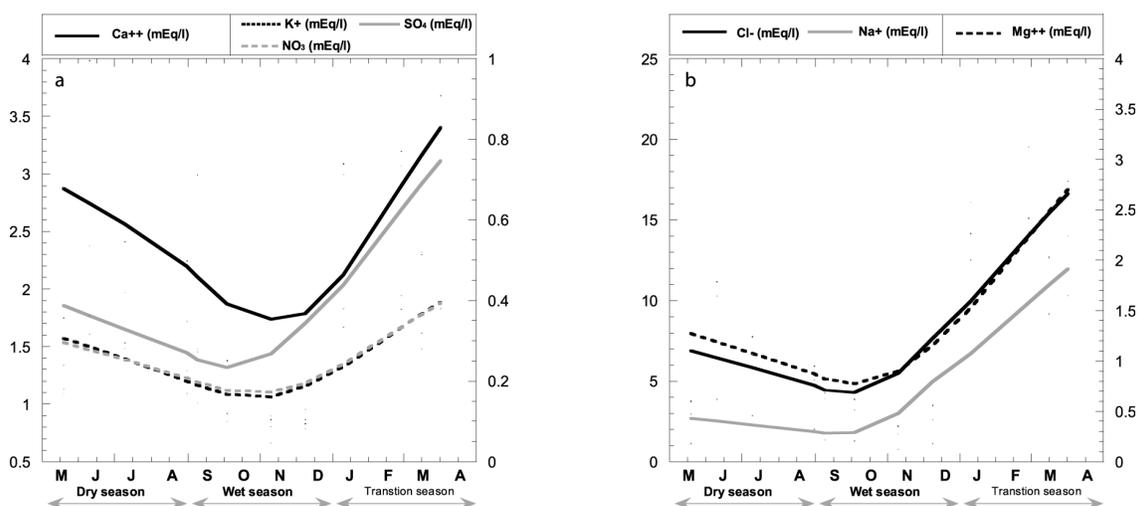


Figure V.9 : Variation saisonnière des éléments chimiques de la rosée durant la période d'étude (Mai 2007- Avril 2008). (a) Ordonnée gauche : Ca^{2+} . Ordonnée droite : K^+ , NO_3^- and SO_4^{2-} . (b) Ordonnée gauche : Na^+ and Cl^- . Ordonnée droite : Mg^{2+} .

Tableau V.5 : Comparaison entre la saison humide, de transition et sèche pour la période d'étude.

	Saison sèche	Saison de transition	Saison humide
Cumul de pluie (mm)	13,14	13,94	21,54
Cumul de la rosée (mm)	3,11	6,11	9,63
Temps de condensation (heure)	5,95	10,49	11,63
Vitesse de vent (moyenne en m/s)	2,22	1,57	1,35
Somme des cations (moyenne en mEq/L)	6,53	17,38	3,3
Somme des anions (moyenne en mEq/L)	6,58	16,61	3,17
d'origine continental (moyenne en mEq/L)	2,9	3,42	1,6
Sels marins (moyenne en mEq/L)	9,89	29,25	4,56
Origine anthropique (moyenne en mEq/L)	0,59	1,03	0,31

Ce paragraphe a permis de caractériser l'évolution temporelle des concentrations élémentaires chimiques dans la rosée avec notamment des regroupements d'éléments en fonction de leur comportement saisonnier.

Au regard des valeurs de concentrations extrêmes, les éléments affichant la plus forte variabilité au cours de l'année suivent l'ordre suivant ; Cu, Cl⁻, K⁺, Na⁺, SO₄²⁻, Mg²⁺, Ca²⁺ et NO₃⁻, tandis que Pb est le plus stable dans l'eau de rosée. En considérant un seuil de 100 %, tous les éléments de la pluie présentent des écarts les plus importants et montrent une variation temporelle plus importante que ceux de la rosée. Cette variabilité est peut être due à la différence du nombre d'échantillons collectés à différentes périodes de l'année pour les deux sources.

Diviser l'année en saisons, conduit à une simplification du système. Néanmoins, ce mode de recoupement permet de dégager un certain nombre de caractéristiques.

L'évolution de la composition chimique de la rosée au cours de l'année montre un cycle saisonnier significativement marqué pour la majorité des éléments (Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, K⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻). Ainsi les phénomènes à l'origine de ces variations saisonnières affectent la nature chimique de la rosée.

Les valeurs de concentration associées à chaque saison mettent en évidence des comportements variés selon les éléments, avec des profils de concentration bien marqués entre la période Transition – Sèche et la période Humide.

A partir des données de la littérature et de ces résultats, différentes hypothèses peuvent être proposées pour justifier les variations temporelles et notamment saisonnières observées sur la période étudiée :

(1) Existence de variations saisonnières de la précipitation. Au cours des périodes pluvieuses, l'atmosphère est soumise à un phénomène de lessivage plus intense que lors des périodes plus sèches.

(2) Existence de variations saisonnières des flux de dépôt des aérosols atmosphériques ou du mode de dépôt entre la saison sèche, de transition et humide.

(3) Phénomène de dilution des ions dans la rosée. Cette hypothèse est probable si les périodes caractérisées par un temps de condensation élevé et des plus faibles concentrations coïncident. Ainsi, la diminution des concentrations en Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} observée dans notre étude, sur la saison humide serait liée aux temps élevés de condensation sur la période.

(4) La quatrième hypothèse relève des variations climatiques durant l'année d'étude. La direction et la vitesse du vent, l'influence de la trajectoires des masses atmosphériques (origine marine ou terrestre) sur la saison de transition et sèche, aboutit, sur la période, à l'agitation de l'atmosphère (vitesses du vent élevées) et l'apport des aérosols d'origine terrestre ou marin.

V.5 Origine des éléments chimiques dans l'eau de rosée et de pluie

V.5.1 Relation entre les éléments chimiques

Le nombre d'échantillons étant suffisamment important pour faire une étude statistique, notre approche statistique s'est déroulée en deux étapes :

1- *Matrices de corrélation* : elles indiquent les coefficients de corrélation R^2 des éléments chimiques. L'analyse par corrélation est une technique utile pour caractériser des relations entre les ions dans l'eau de la rosée et de pluie.

2- *Analyses factorielles et l'Analyse en Composantes Principales* ont été utilisées pour traiter les résultats obtenus dans ce travail.

V.5.1.1 Matrices de corrélation

L'analyse de corrélation est une technique utile pour caractériser les relations entre les ions présents dans les eaux. Afin de trouver l'association entre des ions dans les précipitations ainsi que leurs sources éventuelles, les corrélations entre les ions dans la rosée et la pluie sont calculées et représentées dans les tableaux V.6 et V.7.

➤ Dans l'eau de rosée

Les espèces dites dérivées du sol telles que Ca^{2+} et K^+ montrent de bonnes corrélations, ce qui suggère leur origine continentale. De la même façon, les corrélations importantes sont

aussi observées entre l'espèce du sel de mer Na^+ et Cl^- avec un coefficient de corrélation de 0,981 indiquant leur source marine commune. Pour Mg^{2+} , NO_3^- et SO_4^{2-} , ils présentent une bonne corrélation à la fois avec Ca^{2+} et K^+ et avec Na^+ et Cl^- induisant ainsi des origines diverses. Les bonnes corrélations observées entre les sulfates et les nitrates peuvent être attribuées à la ressemblance de leurs comportements chimiques dans la rosée. Leur coefficient de corrélation est 0.895.

➤ **Dans l'eau de pluie**

Pour trouver les associations possibles entre les ions dans la pluie, et par conséquent, leurs sources probables, les corrélations entre ces éléments ont été calculées et présentées dans le tableau V.7. Les ions acides NO_3^- et SO_4^{2-} sont bien corrélés ($R = 0.945$) qui indiquent leurs origines semblables, ceci peut être attribué à la ressemblance de leurs comportements chimiques dans les précipitations et la co-émission de leurs précurseurs SO_2 et NO_x . De la même façon, la bonne corrélation observée entre Ca^{2+} et K^+ ($R = 0.73$), Ca^{2+} et Mg^{2+} ($R = 0.623$) suggère une origine commune, probablement continentale. D'autres bonnes corrélations ont été observées entre Mg^{2+} et Cl^- (sel MgCl_2 marin), K^+ et Cl^- , Na^+ et Cl^- (sel NaCl marin), Mg^{2+} et Na^+ .

Tableau V.6 : Matrice de corrélation des éléments chimiques de la rosée.

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cu	Pb
Ca ²⁺	1								
Mg ²⁺	0.754	1							
K ⁺	0.776	0.778	1						
Na ⁺	0.641	0.909	0.730	1					
Cl ⁻	0.724	0.922	0.782	0.981	1				
NO ₃ ⁻	0.894	0.868	0.895	0.783	0.852	1			
SO ₄ ²⁻	0.893	0.908	0.809	0.885	0.910	0.895	1		
Cu	-0.427	-0.810	-0.435	-0.904	-0.852	-0.586	-0.731	1	
Pb	-0.493	-0.697	-0.354	-0.697	-0.701	-0.563	-0.653	0.804	1

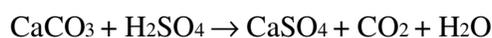
Tableau V.7 : Matrice de corrélation des éléments chimiques de la pluie.

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cu	Pb
Ca ²⁺	1								
Mg ²⁺	0.623	1							
K ⁺	0.730	0.940	1						
Na ⁺	0.332	0.866	0.699	1					
Cl ⁻	0.555	0.959	0.881	0.947	1				
NO ₃ ⁻	0.136	0.403	0.419	0.569	0.593	1			
SO ₄ ²⁻	0.016	0.262	0.326	0.445	0.474	0.945	1		
Cu	-0.279	-0.669	-0.429	-0.702	-0.598	0.062	0.286	1	
Pb	-0.408	-0.150	-0.098	0.131	0.077	0.757	0.887	0.510	1

Les corrélations observées dans les précipitations locales (rosée et pluie) peuvent être causées par les réactions chimiques atmosphériques des acides H₂SO₄, HNO₃ et HCl avec les composés alcalins riches dans les matières "carbonates" portées dans l'atmosphère par le vent. Cela montre l'influence du sol sur la chimie des précipitations (Khemani et al., 1985 ; Applin and Jersak, 1986 ; Munger, 1982 ; Varma, 1989 ; Casado et al., 1992).

Les événements NaCl peuvent être considérés comme des arrivées massives de la source NaCl, ici majoritaires par rapport aux autres sources. Il existait plusieurs sources possibles de NaCl : l'océan Atlantique, le désert au sud de la région d'étude riche en sels des Sebkhah (Kabbachi, 1998) et l'influence des caractéristiques de la géologie et de la pédologie de la région. Dans notre cas, compte tenu de la position géographique de notre station situé à 200 m de l'océan et l'éloignement du Sahara marocain, la source océanique devrait jouer le rôle majeur.

Les concentrations en Ca²⁺ et SO₄²⁻ se corrélaient mieux dans la rosée que dans la pluie. L'origine de ces éléments peut être les zones évaporitiques du Sahara marocain le long du bassin Tarfaya-Laayoun qui contient du gypse dans les Sebkhah qui peuvent donc émettre directement des microcristaux de gypse. Cependant, cette source de gypse primaire ne paraît pas assez massive pour expliquer les fortes concentrations dans la rosée. Dans les Alpes (Ronseaux and Delmas, 1988), les poussières d'origine saharienne sont de nature principalement carbonatée mais elles sont attaquées par l'acidité atmosphérique H₂SO₄, HNO₃, HCl au cours de leur transport. On peut envisager de même dans la région d'étude, la formation de gypse secondaire par réaction du carbonate de calcium avec l'acide sulfurique :



Les valeurs élevées du pH sont dues à la neutralisation de l'acidité par les éléments alcalins. Cette neutralisation a été confirmée par une bonne corrélation entre les ions acides SO₄²⁻ et NO₃⁻ et les cations majeurs Ca²⁺, K⁺ et Mg²⁺.

V.5.1.2 Analyses factorielles

➤ Dans l'eau de rosée

Le premier composant (facteur 1) qui représente 47.56% de la variance totale est défini par plusieurs variables : Ca²⁺ et K⁺ suggérés de source continentale (substrat local et régional) et NO₃⁻ (Tableau V.8). La présence du nitrate dans ce facteur est plus complexe à expliquer. Ses origines se trouvent principalement dans l'automobile, les activités de l'industrie, agricole

et biomasse brûlée (Zunckel et al. 2003), le nitrate dans la rosée peut dériver d'autres sources comme les excréments des insectes, oiseaux ou petits mammifères venus au niveau du condenseur pour s'alimenter en eau de rosée au condenseur. Une partie de l'azote du sol regagne l'atmosphère suite à l'action des bactéries qui dégradent les nitrates en N_2O puis en N_2 qui sont libérés dans l'atmosphère. A l'inverse, une partie de l'azote atmosphérique s'incorpore dans la biosphère et se transforme en nitrate grâce à l'énergie des éclairs qui favorise les liaisons d'atomes d'azote et d'oxygène et donc la production de NO_3^- que rosées et pluies ramènent au sol. Le poids d'azote ainsi précipité à la surface du sol est estimé à 1 à 10 Kg/ha/an, voir d'avantage si les orages sont fréquents dans la zone concernée (L'hirondel, 1996).

Le deuxième composant (facteur 2) est défini par Cl^- et Na^+ , Mg^{2+} et SO_4^{2-} . L'association de Cl^- et Na^+ dans ce composant paraît être dû au sel marin riche en NaCl. Les deux éléments Mg^{2+} et SO_4^{2-} peuvent être considérés comme les ions d'origines diverses dans la rosée parce que Mg^{2+} vient bien que principalement de sources marine et peut être aussi de sources continentale (sol local) et les sulfates SO_4^{2-} sont issus de la dissolution des oxydes de soufre (H_2SO_4) générés par les activités anthropiques. Ce composant couvre 40.73 % de la variance totale.

➤ Dans l'eau de pluie

Du fait de la différence des volumes d'eau précipitée, la composition et les concentrations en substances diverses sont très variables. Néanmoins, on retrouve des éléments communs avec ceux de la rosée. Les gouttelettes d'eau adsorbent une grande partie des particules atmosphériques d'origine océanique et terrestre et dissolvent les gaz contenus dans l'atmosphère. Le dioxyde de carbone présent dans l'air se dissout dans l'eau sous forme d'hydrogénocarbonate HCO_3^- induisant un pH généralement compris entre 4 et 7. Les activités anthropiques génèrent par ailleurs des oxydes de soufre (H_2SO_4) et des composés azotés (HNO_2 et NH_3) qui peuvent modifier le pH. La dissolution de ces composés induit la formation de sulfates (SO_4^{2-}) et d'oxydes d'azote (NO_2^- et NO_3^-). Ainsi le facteur 2 qui représente 34.45% de la variance est fortement corrélé avec SO_4^{2-} et NO_3^- . L'influence de la mer se fait toujours sentir en apportant des ions chlorure (Cl^-) et des ions sodium (Na^+) qui définit le facteur 1 (38.46%).

Tableau V.8 : Corrélations entre les variables et les facteurs issus d'une ACP (Rosée).

Eléments	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
Ca ²⁺	0.92	0.14	0.05	0.32
Mg ²⁺	0.68	0.70	0.05	0.09
K ⁺	0.90	0.26	0.19	-0.16
Na ⁺	0.54	0.76	0.36	0.04
Cl ⁻	0.63	0.68	0.33	0.09
NO ₃ ⁻	0.89	0.37	0.07	0.12
SO ₄ ²⁻	0.79	0.50	0.19	0.22
Cu	-0.23	-0.92	-0.22	-0.19
Pb	-0.23	-0.68	-0.11	-0.65

Tableau V.9 : Coordonnées factorielles après une ACP (Pluie).

Eléments	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
Ca ²⁺	0.21	-0.10	0.97	0.00
Mg ²⁺	0.81	0.10	0.48	0.33
K ⁺	0.57	0.16	0.65	0.47
Na ⁺	0.92	0.33	0.17	0.06
Cl ⁻	0.81	0.33	0.42	0.21
NO ₃ ⁻	0.28	0.93	0.18	-0.04
SO ₄ ²⁻	0.11	0.98	0.09	0.11
Cu	-0.91	0.38	-0.06	0.15
Pb	-0.15	0.94	-0.30	0.06

V.5.2 Estimation de la contribution marine

Pour estimer la contribution des différents ions constituant l'eau de rosée et de pluie, la fraction du sel de mer (Sea-salt fraction ; SSF) a été calculée, les autres espèces étant qualifiées d'origine non marine (NSSF). Le sodium (Na^+) considéré d'origine marine est la référence principale de ce calcul (Keene et al, 1986 ; Kulshrestha et al, 1996 in Al Obaidy et al, 2006) ainsi que la concentration ionique de l'eau de mer donnée par Riley et Chester (1971). Cependant, les paramètres SSF et NSSF sont décrits par l'utilisation des équations suivantes :

$$\% \text{SSF}_X = 100 \times \frac{(\text{Na})(X / \text{Na})_{\text{sea}}}{X} \quad (\text{V.3})$$

$$\% \text{NSSF}_X = 100 - \text{SSF}_X \quad (\text{V.4})$$

où X est le composant dont on veut connaître l'origine.

Les résultats présentés dans le Tableau V.10 montrent que Ca^{2+} et K^+ sont d'origines non marines avec un pourcentage de 90,14% et de 51,86% pour la rosée et 91,46% et 94,18% pour la pluie. Le Mg^{2+} dans l'eau de rosée semble affecté par les particules du sel de mer ainsi que le Cl^- dont le %SSF est respectivement égal à 84,47% et 74,42%. Dans la pluie, on remarque les mêmes constatations avec 79,85 %SSF et 84,21 %SSF. Ces pourcentages indiquent la contribution possible d'autres composants, probablement du sol.

Tableau V.10 : Comparaison entre des ratios des ions par rapport au Na^+ de l'eau de mer avec ceux de la rosée et de la pluie.

	Ratios de l'eau de mer	Ratios de la rosée	%SSF de la rosée	%NSSF de la rosée	Ratios de la pluie	%SSF de la pluie	%NSSF de la pluie
Ca mEq/l	0.044	0.45	9.86	90.14	0.52	8.45	91.46
Mg mEq/l	0.227	0.27	84.47	15.53	0.28	79.85	20.15
K mEq/l	0.022	0.05	48.14	51.86	0.38	5.62	94.18
Cl mEq/l	1.166	1.57	74.42	25.58	1.38	84.21	15.79
SO4 mEq/l	0.04	0.07	53.37	46.63	0.12	34.17	65.83

V.5.3 Facteur de neutralisation

Les valeurs élevées du pH sont dues à la neutralisation de l'acidité par les éléments alcalins. Cette neutralisation a été confirmée par une bonne corrélation entre les ions acides SO_4^{2-} et NO_3^- et les cations majeurs Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+} avec $R^2 = 0.96$ (Figure V.10). Les substances acides (SO_4^{2-} , NO_3^-) contenues dans l'eau de rosée et de pluie réagissent avec les composantes basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+). Pendant cette opération l'acidité disparaît et l'eau devient neutre. Dans le but de déterminer le rôle joué par les cations pour neutraliser l'acide sulfurique et nitrique, le facteur de neutralisation (NF) est calculé selon la formule suivante (Possanzini et al, 1988, Das et Al, 2005) :

$$NF_X = [X] / [NO_3^- + SO_4^{2-}] \quad (V.5)$$

où X est l'espèce responsable de la neutralisation (Tableau V.11).

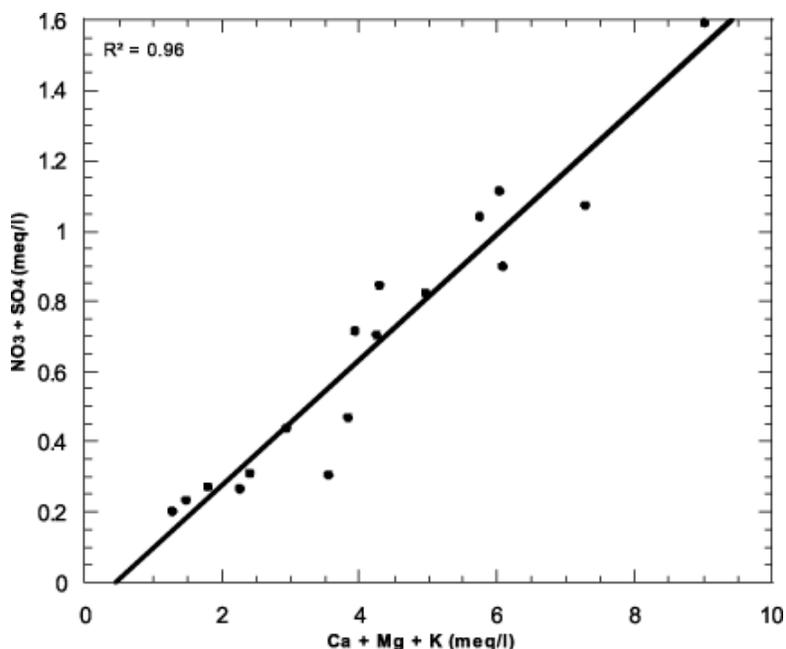


Figure V.10 : Comparaison entre les éléments alcalins (Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+}) et les ions acides (SO_4^{2-} et NO_3^-) dans l'eau de rosée.

La concentration importante de calcium comparée aux autres ions dans la rosée et la pluie implique que le cation le plus neutralisant est le Ca^{2+} avec un NF le plus élevé, suivi par Mg^{2+} puis K^+ . De plus, les NF de la rosée sont supérieurs à ceux de la pluie à l'exception du potassium, ceci s'explique par le fait que le condenseur est situé au voisinage du sol, sa surface alors est exposée à toutes les particules (Ca^{2+} , Mg^{2+}) qui augmentent le pouvoir neutralisant de l'eau collectée.

Tableau V.11 : Facteurs de neutralisation des ions dans la rosée et la pluie.

	La rosée	La pluie	NF de la rosée	NF de la pluie
Ca mEq/l	2.44	1.54	3.64	2.65
Mg mEq/l	1.47	0.85	2.19	1.46
K mEq/l	0.25	1.13	0.37	1.95

V.6 Influence du climat sur la composition chimique de la rosée

La formation de la rosée par condensation de l'humidité atmosphérique dépend de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. La régénération des gouttes d'eau sur les surfaces se réalise quand la température de celles-ci est inférieure à la température de rosée et par conséquent, la période de condensation déterminée par la grandeur (dt) est importante. L'incorporation des aérosols dans cette eau est fonction des conditions météorologiques (temps de condensation dt , vitesse du vent, volume d'eau condensé...). Elle se fait selon deux méthodes ; soit par un dépôt humide des aérosols, encore appelé "In cloud scavenging" (Barrie & Schemenauer, 1989) qui résulte de la capture des particules par les gouttelettes d'eau en cours de formation, soit par dépôt sec (Davidson & Wu, 1989) où les particules, véhiculées par les masses d'air, peuvent venir s'impacter sur différents obstacles tels que la surface du condenseur.

V.6.1 Influence du dt , du volume de la rosée et la vitesse du vent

Dans la figure V.11, nous présentons la comparaison des profils des éléments chimiques, du temps de condensation et le profil du volume d'eau collecté pour les échantillons de rosée analysés. On constate qu'une durée de condensation dt importante coïncide avec les grands volumes et avec une diminution des concentrations des ions. Ceci peut être expliqué par le phénomène de dilution des ions dans la rosée (Chang et al. 1986). En partant de la même hypothèse, Beysens et al (2006) observent, pour la rosée de Bordeaux, une

diminution de concentration au cours des périodes où la condensation est intense. Pour les ions dérivés du sel marin (Cl^- , Na^+ , Mg^{2+}), on observe une diminution de leurs concentrations avec les grands rendements de rosée (Figure V.11a, V.11c). Les espèces dites dérivées du sol Ca^{2+} et K^+ responsables de l'alcalinité de l'eau de rosée et les ions acides NO_3^- , SO_4^{2-} présentent la même évolution en fonction du volume et du temps de condensation (Figure V.11b, V.11d).

La direction et la vitesse du vent influencent les trajectoires des masses atmosphériques d'origine marine ou terrestre et par conséquent la variation des concentrations chimiques de la rosée. Pendant la période sèche et de transition où l'atmosphère est agitée par les vitesses des vents élevés, on remarque, que les concentrations en Ca^{2+} et K^+ augmentent grâce à la mobilisation des aérosols aux alentours du système de collecte, ceci coïncide avec la diminution du volume d'eau condensé (Figure V.12).

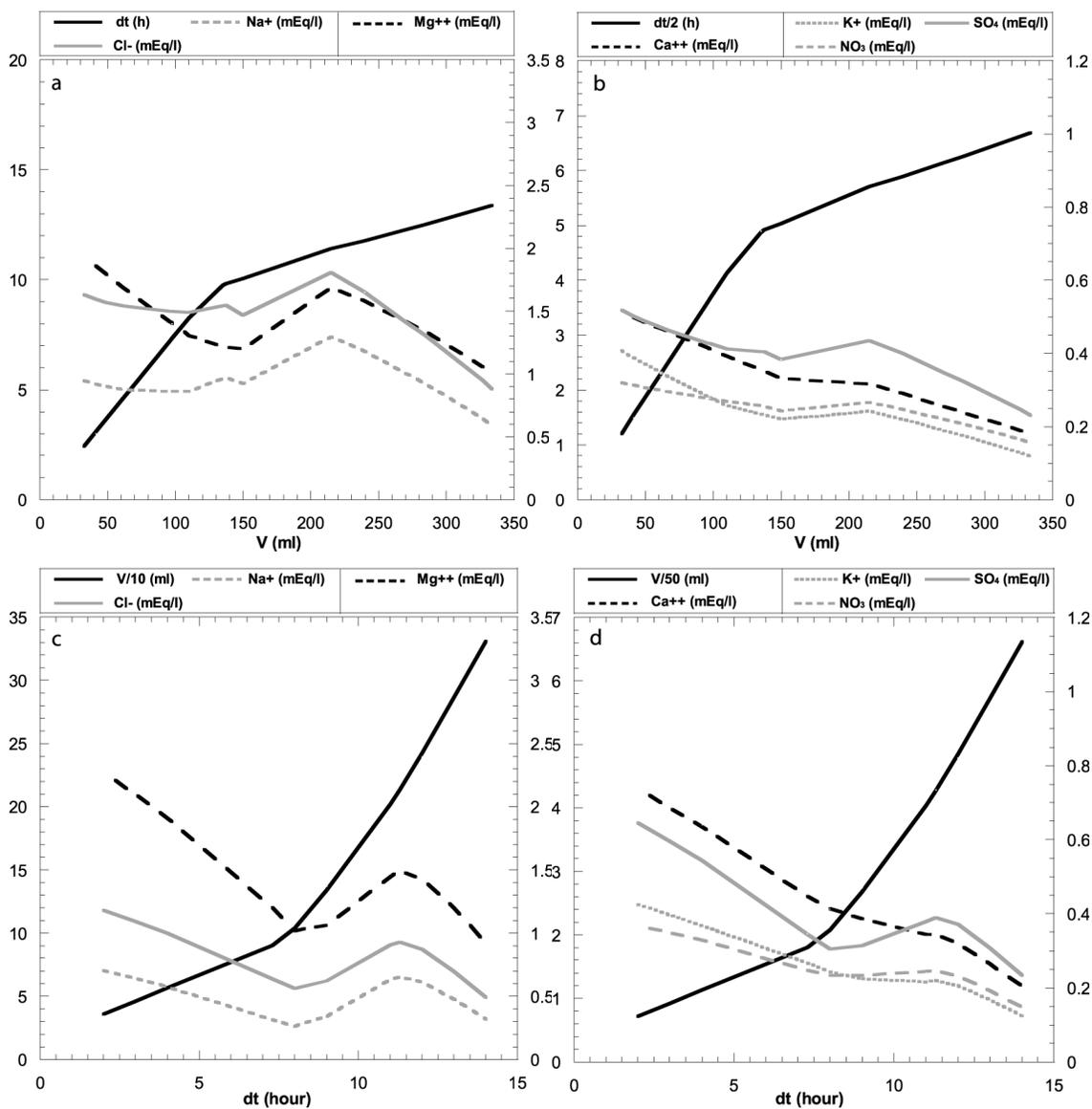


Figure V.11 : Corrélation entre les ions (mEq/l) avec le volume de rosée (V en ml) et le temps de condensation (*dt* par heure). Les sels marins (Na⁺, Cl⁻: ordonnée gauche, Mg²⁺ : ordonnée droite) dans (a et c). Les espèces dérivés du sol (Ca²⁺ : ordonnée gauche, K⁺: ordonnée droite) sont dans (b et d). Les ions (NO₃⁻, SO₄²⁻, l'ordonnée droite) dans (b et d).

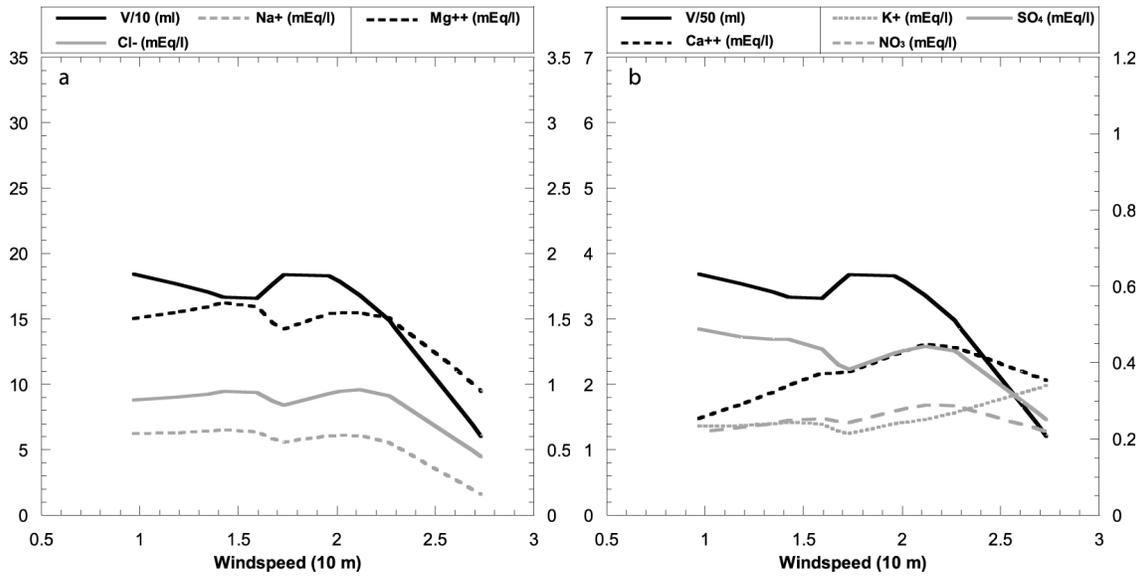


Figure V.12 : Corrélation entre les ions (mEq/l) avec la vitesse du vent (m/s). (a) ordonnée gauche : V/10 (ml), Na⁺ et Cl⁻. Ordonnée droit : Mg²⁺. (b) ordonnée gauche : V/50 (ml) et Ca²⁺. Ordonnée droit : K⁺, NO₃⁻ et SO₄²⁻.

V.6.2 Zonalité climatique de la rosée

Nous avons vu qu'il pouvait y avoir une influence du climat sur les ions dans la rosée. Suivant le volume d'eau condensé (la durée de condensation) et la vitesse du vent, la composition chimique de l'eau présentait des caractères très différents. A ces paramètres peuvent s'ajouter d'autres facteurs tels que l'influence des aérosols caractérisés par une diversité des sources d'émissions et une variabilité spatiale des concentrations dans chaque région.

V.6.2.1 La rosée de Mirleft, de Zadar (Croatie) et Bordeaux (France)

La chimie de la rosée de la région de Mirleft montre qu'elle est plus riche en éléments que celle de Zadar et de Bordeaux (Tableau V.12), cette différence est due à la forte teneur en NaCl et aux fortes contributions des apports d'aérosols. On sait que la concentration des aérosols est d'autant plus importante que le pouvoir évaporant est plus grand, c'est-à-dire que la température de l'air et sa sécheresse sont plus élevées. Elle est donc plus importante dans un climat aride tel que celui de Mirleft. Il y a là une influence essentiellement climatique qui entraîne une certaine zonalité.

Les activités humaines, les poussières terrestres et en plus les gaz à effet de serre, rejettent dans l'atmosphère des particules en suspension que l'on appelle les particules d'aérosols. Ces particules représentent une quantité importante accumulée dans l'atmosphère et peuvent influencer la chimie de la rosée. Trois principales causes peuvent être dégagées pour expliquer la zonalité de la rosée : la variabilité spatiale des concentrations d'aérosols, leur variabilité temporelle et enfin la diversité des sources d'émissions et des types d'aérosols.

Tableau V.12 : La chimie de la rosée à Mirleft, à Zadar et à Bordeaux.

	La rosée à Mirleft	La rosée à Zadar (Croatie)	La rosée à (Bordeaux)
pH in situ	7,40	6,7	6,26
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	725,25	195,59	45,10
MT mg/L *	560	160	35
Ca⁺⁺ mg/L	48,27	34,7	1,47
Na⁺ mg/L	99,27	13,18	3,60
Mg⁺⁺ mg/L	16,19	2,84	0,36
K⁺ mg/L	9,50	2,3	0,41
Cl⁻ mg/L	255,52	23,7	5,52
SO₄²⁻ mg/L	18,34	3,88	3,75
NO₃⁻ mg/L	14,90	0,71	2,80
Cu mg/L	<0,018		0,0027
Pb mg/L	< 0,005		
Zn mg/L	0,022		0,036

* MT mg/L : Minéralisation totale

V.6.2.2 Les rétros-trajectoires des masses d'air

Le modèle Hysplit permet de calculer la position d'un point de l'atmosphère en remontant dans le temps, c'est ce que l'on appelle une rétro-trajectoire (Draxler et Rolph, 2003). On peut ainsi connaître le trajet d'une particule d'air pendant les heures qui ont précédé son analyse. On a utilisé ce modèle en libre service sur l'Internet pour calculer les rétro-trajectoires sur le site d'étude (<http://www.arl.noaa.gov/>). Pour ce faire, on a tout d'abord extrait la position du site (latitude, longitude), puis ces données ont servi à alimenter le modèle qui nous a donné en sortie la position de la masse d'air à durant 48 heures précédant le jour de la collecte de la rosée. On a finalement tracé ces rétro-trajectoires sur des cartes avec une couleur différente en fonction de l'altitude de la masse d'aire (Figure V.13). Le temps entre deux triangles le long des rétro-trajectoires représente 6 heures.

On remarque que pour les périodes qui nous intéressent, au niveau de Mirleft, les particules d'air ont une origine océanique et continentale pour le 19/05/2007 (Figure V.13.A) et le 29/04/2008 (Figure V.13.C), ce qui signifie qu'elles ont passé les 48 dernières heures au dessus du Sahara et de l'océan. Par ailleurs, les particules d'air rencontrées le 03/10/2007

(Figure V.13.B), ont passé très peu de temps au dessus du continent et proviennent essentiellement de l'océan atlantique.

L'étude des rétro-trajectoires nous permet de montrer qu'il existe une relation entre la forte concentration en élément chimique de la rosée (pH élevé) de la région et l'origine continentale (désertique) de la masse d'air correspondante à Mirleft.

Les informations fournies par les champs de vents et les rétro-trajectoires nous permettent ainsi de fournir la conclusion suivante : la masse d'air traversée au dessus de Mirleft se caractérise par une origine mixte ; océanique et continentale (désertique).

Au niveau de Zadar (Figure V.14), des variations au niveau du pH ont été observées dans l'eau de rosée et de pluie lors des mesures effectuées de 2004 à 2007. Ces variations s'expliquent par les influences antagonistes des aérosols originaires de l'environnement continental : des épisodes avec un pH le plus élevé sont observés dans les situations où les masses d'air arrivent des régions arides d'Afrique du Nord, expliquant l'enrichissement observé en calcium et des épisodes de pH faible sont observés lorsque des masses d'air passent au-dessus des régions industrielles européennes, principalement attribuées à la pollution par l'acide sulfurique.

En effet, les particules d'air ont pour origine l'Afrique du nord deux jours avant le 05/08/2004 (A) et le 24/05/2005 (C), ce qui signifie qu'elles ont passé les 48 dernières heures au dessus de l'Afrique et de la Méditerranée. Cette masse d'air s'enrichit d'humidité et elle vient en Croatie comme un vent (JUGO) chaud et humide riche en aérosol sans doute responsable du pH élevé. Par ailleurs, les masses d'air rencontrées le 01/01/2005 (B) et 19/10/2005 (D) où le pH est faible, proviennent essentiellement du nord, ce vent (BORA) est froid et sec.

Sur la figure V.15, on constate que selon leur nature, les diverses sources d'aérosols sont globalement réparties selon des régions distinctes. Ainsi, les panaches d'aérosols issus des sources urbaines (industrie, transport, utilisation domestique) sont répartis principalement dans l'hémisphère nord (Zadar et Bordeaux), alors que les émissions de poussières minérales se situent au niveau des déserts comme celui du Sahara par exemple proche de Mirleft. À ces répartitions complexes des sources d'émissions sur le globe, s'ajoutent des évolutions temporelles propres à chacune. En effet, les sources liées aux activités urbaines émettent régulièrement alors que les émissions désertiques sont sporadiques, dépendant des conditions de vent et d'humidité.

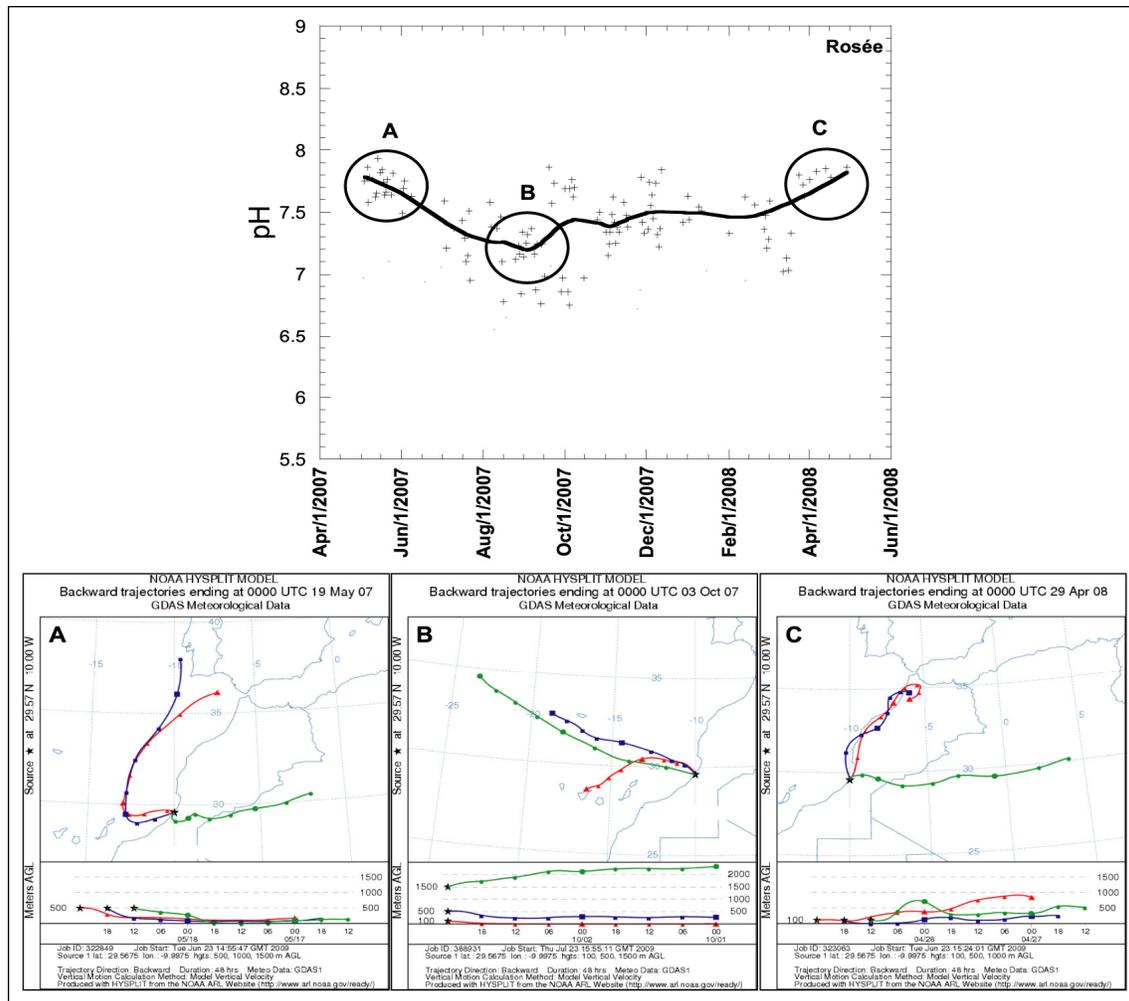


Figure V.13 : Rétro trajectoires à 2 jours des masses d'air sur le site de Mirleft, à différentes altitudes (— à 100 m, — à 500 m, — à 1500 m). Sur les tracés, les symboles indiquent la position des masses d'air toutes les 6 heures. Les trajectoires sont calculées à partir du système Hysplit du Air Resources Laboratory (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) ; <http://www.arl.noaa.gov/ready/open/hysplit4.html>.

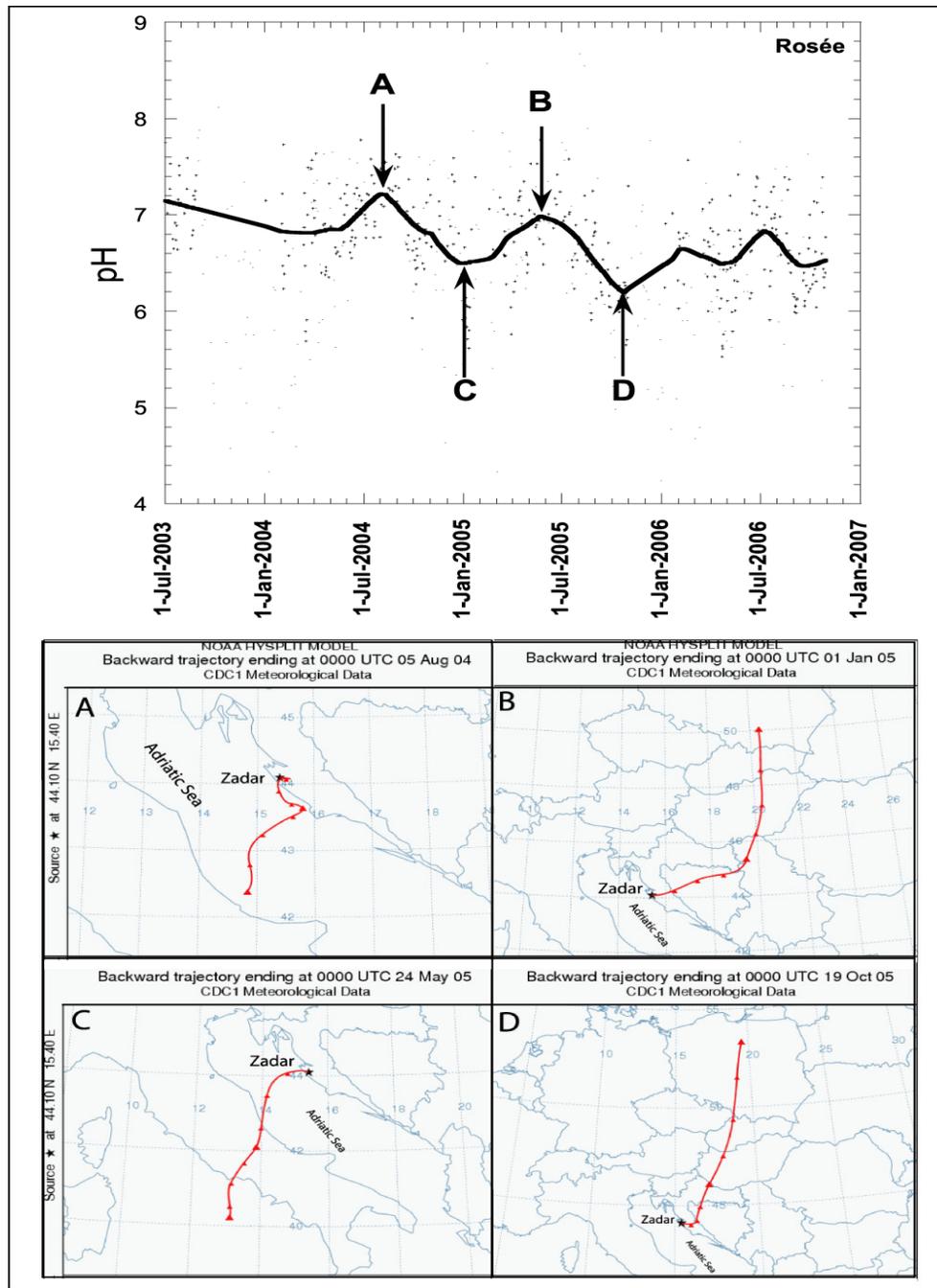


Figure V.14 : Rétro trajectoires à 2 jours des masses d'air sur le site de Zadar, à une altitude de 100 m par rapport au niveau de sol. Sur les tracés, les symboles indiquent la position des masses d'air toutes les 6 heures.

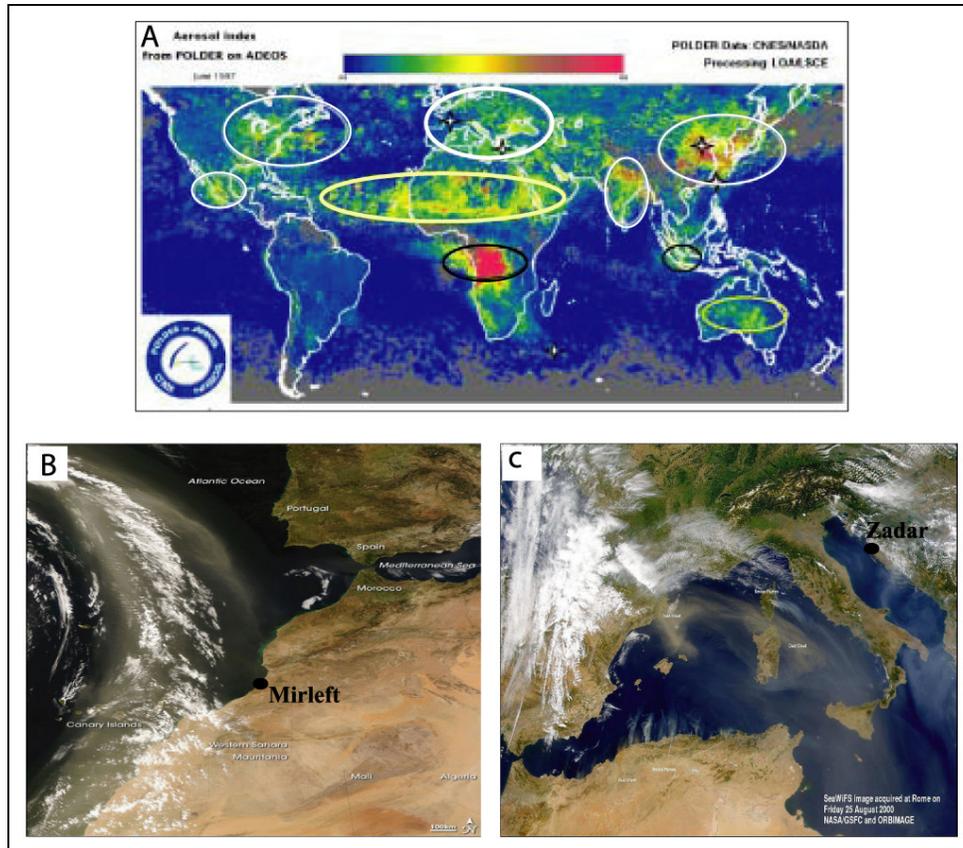


Figure V.15 : Répartition des aérosols dans le monde. (A) : Index des aérosols enregistrés par le radiomètre POLDER en juin 1997. Les contours blancs indiquent les sources urbaines, les contours jaunes précisent les panaches de poussières minérales, et enfin les contours noirs montrent les zones de panaches de feux de brousse. (Source : base de données mise à disposition par l'équipe "MODIS Atmosphere" du centre de la NASA Goddard Space Flight Center). (B) : Tempête au large de la côte ouest africaine où les poussières s'étendent vers Mirleft. (C) : Transport de poussières désertiques provenant de la bande saharienne au dessus de la méditerranée vers Zadar.

V.7 Analyse biologique de la rosée

Dans le cadre de cette étude, deux analyses biologiques de l'eau de rosée ont été effectuées le 5/10/2007 et le 11/01/2008 afin de déterminer une éventuelle contamination. La recherche des coliformes totaux a été faite selon la méthode de filtration sur membrane mais en modifiant les conditions d'incubation. A une température de 22 °C pour la détermination de la flore spécifique de l'eau (Bactéries végétales) et 37 °C pour les bactéries fécales d'origines animales, mais dans notre cas, la source probable de cette pollution peut dériver d'autres sources comme les excréments des insectes trouvés au niveau du condenseur pour s'alimenter en eau de rosée. Les résultats de ces deux analyses indiquent leurs absences. Pour les germes totaux on a identifié une moyenne de 170 CFU (22°C) et 340 (37°C). Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), le risque de déclencher des maladies est très faible pour la population si la concentration en coliformes (les bactéries humaines les plus courantes, donc le meilleur marqueur de pollution biologique) est inférieure à 1000 Unités Formant Colonies (UFC) par litre d'eau.

V.8 Conclusion

L'analyse chimique de la rosée et de la pluie des échantillons récoltés durant cette période a permis d'étudier la potabilité de ces eaux et de les comparer avec celles d'autres régions. Le pH de la rosée et de la pluie est respectivement égal à 7,4 et 6,85. La composition chimique révèle l'abondance du Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} pour les cations et Cl^- pour les anions avec des concentrations très importantes dans l'eau issue de la condensation de la vapeur atmosphérique. La teneur élevée en SO_4^{2-} par rapport à NO_3^- suggère qu'il est l'ion majoritairement responsable du faible pH. Cette acidité est neutralisée en première partie par Ca^{2+} dont le facteur de neutralisation est le plus important en le comparant avec Mg^{2+} et K^+ .

Les corrélations observées dans ces précipitations locales (la rosée et la pluie) sont très probablement causées par les réactions des acides H_2SO_4 , HNO_3 et HCl avec les composés alcalins riches dans les matières carbonate portées dans l'atmosphère par le vent. Cela montre l'influence du sol sur la chimie des précipitations (Casado et al. 1992). Les événements NaCl peuvent être considérés comme des arrivées massives de la source NaCl , ici majoritaires par rapport aux autres sources. Il existait deux sources possibles de cet élément ; l'océan Atlantique et l'influence des caractéristiques de la géologie et de la pédologie de la région. Dans notre cas, compte tenu de la position géographique de notre station située à 200 m de l'océan, la source océanique devrait jouer un rôle majeur. L'analyse en composantes principales (ACP) sur nos données a permis d'évaluer deux composants qui expliquent 88,29 % de la variance totale dans la rosée et qui ont été interprétés comme deux sources des éléments chimiques ; une océanique et l'autre provenant du sol. Ceci est confirmé par le calcul de la fraction du sel marin (Sea-salt fraction ; SSF) qui indique que la majorité des composants chimiques ne sont pas influencés par la mer et qu'il existe une contribution possible des autres composants que l'océan.

A partir de nos résultats, on peut justifier les variations temporelles et notamment saisonnières observées sur la période étudiée par les variations climatiques durant l'année d'étude et l'existence de variations saisonnières de la précipitation. Au cours des périodes pluvieuses (saison humide), l'atmosphère, est soumise à un phénomène de lessivage plus intense que lors des périodes plus sèches. La direction et la vitesse du vent influencent la trajectoire des masses atmosphériques (origine marine ou terrestre) sur la saison sèche et de transition, aboutit, sur la période à l'agitation de l'atmosphère et l'apport des aérosols. Par exemple l'évolution temporelle de la composition chimique de la rosée en Ca^{2+} et K^+ présente un cycle saisonnier caractérisé par des maxima en saison de transition et sèche, et des minima

sur la période humide. Pour ces deux éléments, la rupture de profil intervient autour de début octobre et fin décembre et coïncide avec de fortes précipitations, de forts rendements de rosée et des vitesses de vent faibles.

Au vu des différents tracés des principaux rétros trajectoires observées, il est possible d'envisager une origine saharienne pour justifier des flux en éléments d'origine continentale, les éléments de sels de mer (NaCl et MgCl_2) étant associés à des sources océaniques.

La chimie de la rosée de la région de Mirleft montre une forte alcalinité par rapport à celle de Zadar (Croatie) et Bordeaux (France). Cette distinction est probablement due à la zonalité climatique ainsi que la nature des aérosols dans chaque secteur.

On général, l'eau de rosée est directement, potable, puisque sa richesse en minéraux n'est pas un problème en soi. La présence minime de bactéries rend cette eau potentiellement consommable après un traitement antibactérien contre les micro-organismes par des systèmes de microfiltration. Il faut préciser que cette étude a été menée dans une région donnée (Mirleft) où il n'y a pas de pollution industrielle. Il existe les régions sèches telles que les zones du Sud-Ouest au bord de l'Océan Atlantique, caractérisées par de forte humidité, peuvent ainsi utiliser cette ressource supplémentaire de l'eau potable.

VI.1 Introduction

La collaboration de recherche liant les équipes française et marocaine avait pour but l'évaluation de la ressource rosée en climat aride dans la région de sous Mass et spécifiquement à Mirleft. L'étude détaillée des mesures physiques de rendements en fonction des paramètres environnementaux a été longuement détaillée aux chapitres précédents. Les résultats en termes de rendement ainsi que les analyses chimiques de l'eau de rosée effectuées montrent un potentiel intéressant pour la rosée comme ressource d'appoint en eau de qualité. Le succès du condenseur de démonstration dans différentes régions où notre équipe a réalisé ces recherches nous à inciter à équiper des systèmes de collectes à Idousskssou (8 km SE de Mirleft) où des mesures préliminaires sur le toit de l'école avaient déjà eu lieu par OPUR et des élèves de l'Ecole des Mines de Douai.

De nos jours comme dans un passé récent, la mise en valeur des ressources en eau des régions arides est axée sur des projets de grande irrigation. Ces projets offrent cependant peu d'avantages directs pour le petit exploitant agricole ou le nomade qui doivent survivre dans les contraintes de leur environnement sans bénéficier de nouvelles technologies adaptées à leurs besoins. Heureusement, la collecte de l'eau est l'une des méthodes d'amélioration des conditions d'existence de ces populations.

Le financement du projet a été couvert par l'association OPUR grâce à un prix décerné à Owen Clus et avec le soutien de Marc Muselli lors d'un évènementiel Festiventu / Université de Corse de l'édition 2007 du festival du vent de Calvi (Corse, France). L'enveloppe de 10 000 € est attribuée par la compagnie Corsica Ferries pour le financement d'un projet à haute valeur environnementale et de promotion du développement durable.

Pour la réalisation pratique de ce projet, le doctorant bénéficiait de la venue de trois membres de l'OPUR, Owen Clus pour la conception des condenseurs, Marc Durand en soutien logistique et Céline Eudier pour la réalisation d'un film pédagogique sur le projet. La population locale et l'implication de l'Association de développement local IMRJANE ont été essentiels à la bonne marche des travaux, si bien que les efforts des équipes ont abouti à l'installation de trois systèmes (135,7 m² au total) et un filet de récupération de brouillard pour comparaison. Tous les systèmes sont aisément accessibles au niveau du sol :

- Une toiture terrasse (40,6 m²) reconstituée sur la dalle de couverture d'une citerne.
- Une toiture double pente (21,2 m²) a été installée sur une citerne délabrée et qui a donc été réhabilitée pour le stockage des eaux collectées.

➤ Un condenseur au sol de 73,8 m² à bas coût, donc reproductible à grande échelle.

➤ Un filet à brouillard développant 40 m² a été ajouté afin de comparer les collectes relatives de chacune des ressources dans cette région côtière aux fréquentes entrées maritimes nocturnes (brumes).

VI.2 Les systèmes de collecte

VI.2.1 Site

Ce site exceptionnellement favorable à l'installation présente deux citernes de stockage d'eau côte à côte sur une pente d'environ 17° par rapport à l'horizontale. Une citerne présente une surface couverte plane de $10,6 \times 5,3 \text{ m}^2$ et est utilisée comme réservoir tampon pour la distribution d'eau en aval du village, la seconde, de dimensions internes $4,7 \times 3,0 \times 1,60 \text{ m}^3$ est abandonnée.

Le condenseur terrasse ($40,64 \text{ m}^2$) a été installé sur la citerne couverte, la seconde citerne a été réhabilitée (condenseur en toiture double pente de $21,2 \text{ m}^2$, enduit intérieur, rehausse parpaings et système de soutirage d'eau) pour contenir les eaux de rosée et pluie collectées par le condenseur. Le condenseur au sol sur terre-plein de $73,8 \text{ m}^2$ est installé au dessus des citernes pour en recueillir l'eau par gravité.

VI.2.2 Installation

VI.2.2.1 Condenseur Terrasse ($40,64 \text{ m}^2$)

La dalle de la citerne a premièrement été surmontée d'un parapet afin de retrouver une configuration de toiture terrasse traditionnelle. La particularité de cette « toiture » type étant qu'elle est librement et aisément accessible pour la visite du démonstrateur. La Figure II.2 détaille étape par étape l'installation du condenseur terrasse sur la citerne. Il se compose de matériau de type plaque galvanisé blanc avec peinture spécial type OPUR pour favoriser la condensation. Soit 22 plaques de 106 cm de longueur et 200 cm de largeur (environ $40,67 \text{ m}^2$) avec une épaisseur de 0,75 mm. Ils sont tendus sur les plaques d'isolant de polystyrène de 2 cm d'épaisseur.



Figure VI.1 : Aperçu du site dans son état initial. (a) Vue général du village. (b) Le site se trouve en contrebas du village dans une pente qui n'est pas exploitée, ce qui est très intéressant pour nous car notre installation ne perturbera pas les habitudes des habitants. (1) : Condenseur Terrasse (40,64 m²). (2) : Condenseur toiture double-pente (21,2 m²). (3) : Condenseur sur terre plein (73,8 m²).



Figure VI.2 : Installation du condenseur terrasse, maçonnerie, peinture, pose des plaques et première rosée. (a et b) : Aménagement de la citerne par une ceinture maçonnée de hauteur 1m. (c et d) : Peinture et installation des plaques sur la terrasse. (e) : Vue d'ensemble du condenseur terrasse. (f) : condensation de la rosée sur les plaques.

(Photographies : Imad Lekouch et Owen Clus).

VI.2.2.3 Condenseur toiture double-pente (21,2 m²)

La citerne inutilisée a premièrement été rehaussée de trois rangées de parpaings puis d'un pignon destiné à recevoir le faîtage. Le condenseur est ensuite installé suivant les étapes décrites par les photographies suivantes :



Figure VI.3 : (a) : rehaussement de la citerne par des parpaings. (b) : mise en place du faîtage
(c) : vue finale du condenseur double pente, les gouttières des condenseurs terrasse et double
pente collecte de l'eau vers le même système de mesure à l'intérieur de la citerne aménagée.

(photographies : Imad Lekouch et Owen Clus).

VI.2.2.3 Condenseur sur terre plein (73,8 m²)

Le condenseur sur terre-plein a nécessité une préparation (chaînage et stabilisation du sol). Le design a été choisi pour bénéficier de la pente du terrain (17°) pour l'écoulement central de la rosée. Plus encore, les principales surfaces de condensation sont inclinées de 30° dans le but d'augmenter la proportion de gouttes récupérées par écoulement gravitaire (Beysens *et al.*, 2003).

L'installation est décrite par les photographies suivantes :

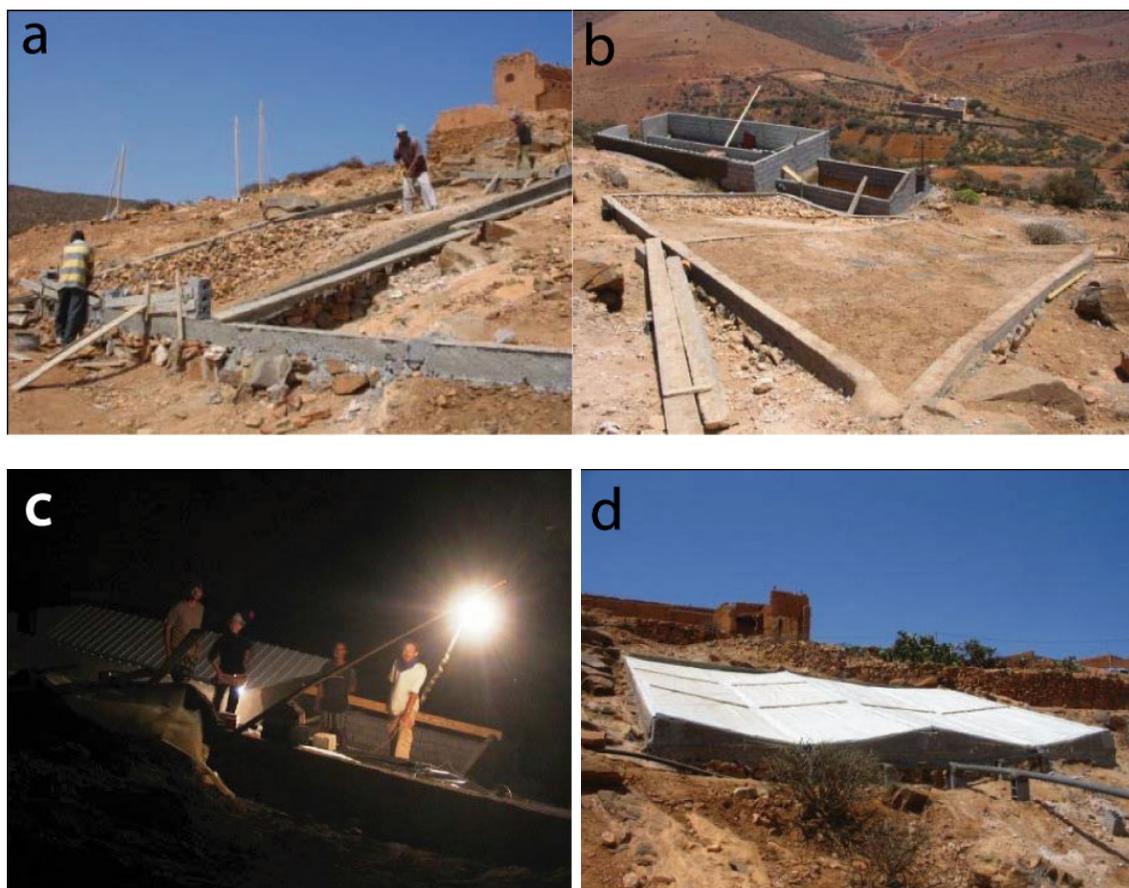


Figure VI.4 : Terrassement et stabilisation de la terre pleine, mise en place du film polymère. (a et b) : Aplanissement du sol et création de pente légère par l'apport de roche et de terre meuble. (c) : L'équipe d'OPUR (Céline EUDIER, Marc DURANT, Owen CLUS et Imad LEKOUCH) travaillent la nuit pour achever le condenseur au sol. (d) : vue finale du condenseur.

VI.2.2.4 Mesures partielles de rosée

Au cours de cette mission, les données ont dans un premier temps été collectées durant 229 jours du 15/12/2008 au 31/07/2009 sur le condenseur toiture terrasse (40,6 m²), le condenseur toiture double pente (21,2 m²) et sur le condenseur au sol de 73,8 m². 137 événements de rosée ont été dénombrés soit 46,9% de la période de collecte avec un volume cumulé de 3791,5 L correspondant à un rendement de 16,6 L / jour sur la période complète et 27,7 L / événement de rosée.

D'après la figure ci-dessus, le condenseur terrasse et double pente (61,8 m²) récoltent presque la même quantité d'eau que le condenseur au sol (73,8 m²). Ceci peut être expliqué par la différence de matériaux de collecte utilisée et la méthode de construction pour chaque système. Cependant l'adaptation des structures aériennes existantes telles que des toitures pour la condensation de rosée a prouvé son efficacité. Sur ce point, l'étude menée par Muselli *et al.* (2006) concluait sur le fait qu'un condenseur suspendu plan de 30 m² condensait environ 14% de plus que son homologue bâti au sol (type « dune »).

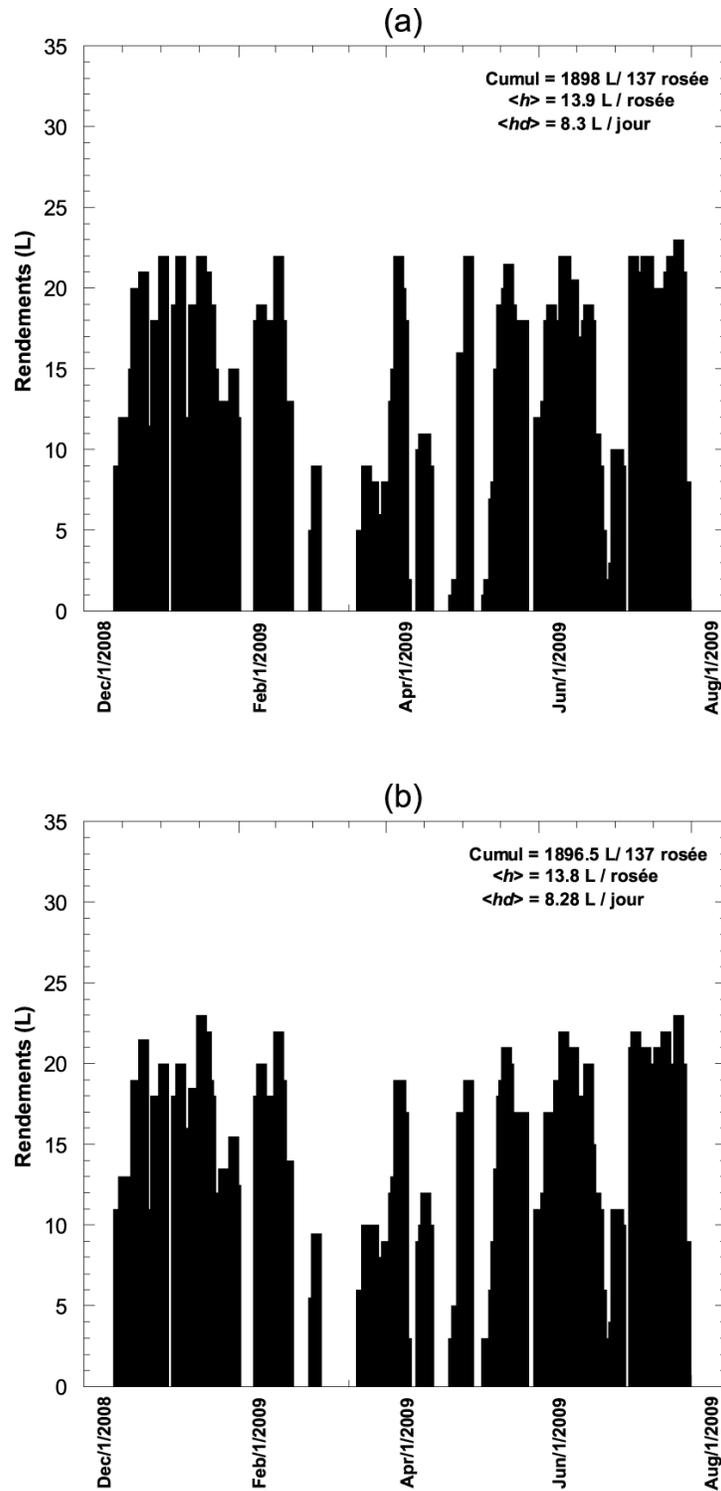


Figure VI.5 : (a) rendements de rosée pour le condenseur toiture terrasse (40,6 m²) et le condenseur toiture double pente (21,2 m²) (229 jours de mesure). (b) Rendements de rosée mesurés sur le condenseur au sol de 73,8 m².

VI.2.2.5 Filet à brouillard (40,0 m²)

Le filet à brouillard est constitué de madriers de bois haubanés et maillés entre eux par du câble gainé de plastique selon la technique décrite par Cereceda et Shemenaiuer (Shemenaiuer *et al.*, 1991 et 1992). Une double couche filet d'ombrage agricole est ensuite cousue sur chaque maille entre poteaux (voir photographies suivantes). Pour des raisons techniques et climatiques, on n'a pas encore utilisé ces filets.

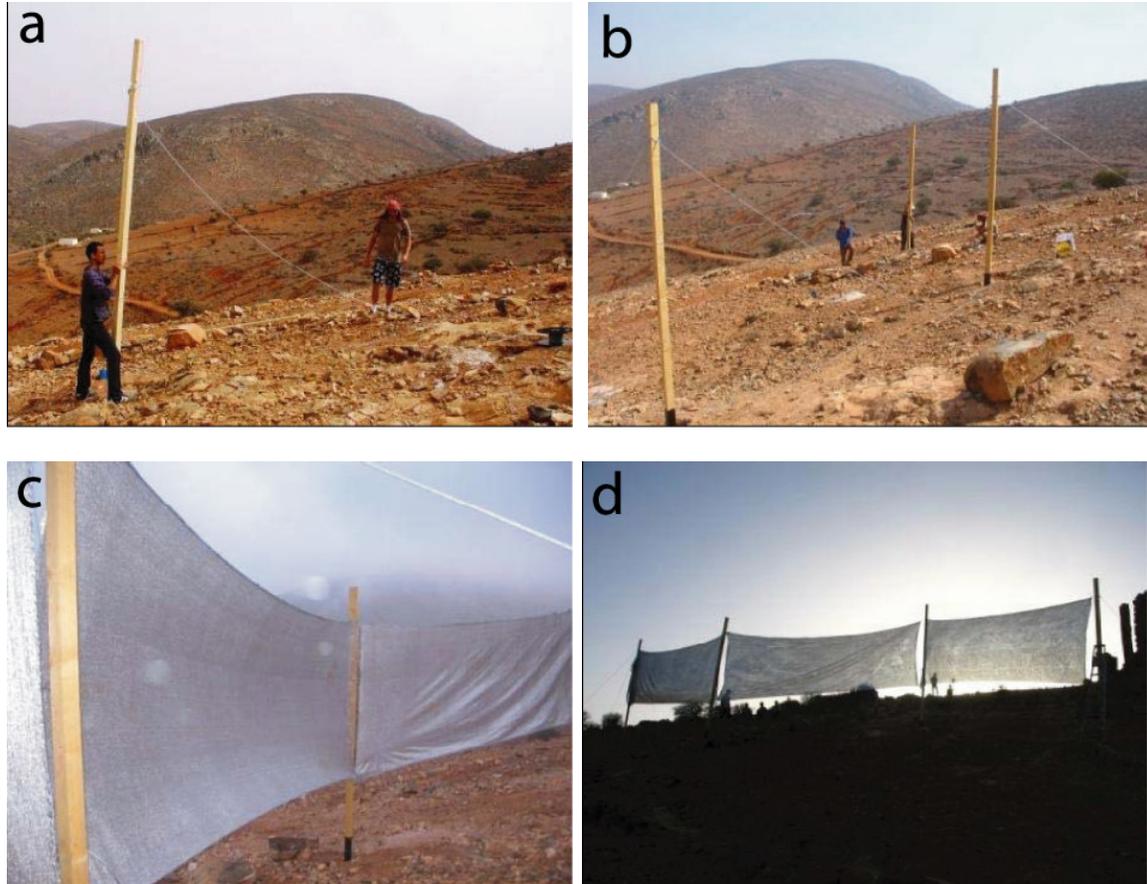


Figure VI.6 : Installation de 40 m² du filet à brouillard, pose des madriers et des filets. (a et b) : installation des poteaux de bois. (c) : emplacement des filets entre les poteaux et sur des câbles d'acier. (d) : vue finale du filet à brouillard. (photographies : Imad Lekouch et Owen Clus).

VI.3 Conclusion

La récupération des eaux atmosphériques (rosée, brouillard et pluie) est un enjeu majeur, à plusieurs niveaux :

Niveau écologique : les régions arides connaissent aujourd'hui des problèmes d'approvisionnement en eau potable. Déjà, certaines régions subissent des restrictions quant à l'utilisation de l'eau potable en période estivale, et ces problèmes risquent de se poser de plus en plus dans les années à venir. La récupération de ces eaux est une réponse concrète et efficace.

Niveau économique : alors que le prix de l'eau potable est en constante augmentation, même si les économies réalisées par l'utilisation des réservoirs n'apparaissent qu'au bout d'un certain temps suivant l'usage désiré et les techniques employées, elles sont significatives sur la consommation d'eau potable.

Cette pratique nécessite maintenant une incitation de la part des gouvernements afin de se généraliser dans les zones où les pénuries d'eaux sont accentuées et les conditions climatiques sont favorables à la récupération de ces eaux.

Le but de la collecte de ces eaux est soit d'augmenter les ressources en eau existantes, soit de fournir de l'eau là où il n'existe pas d'autres sources ou lorsque les coûts d'une mise en valeur sont prohibitifs. Ainsi, il s'agit de fournir de l'eau en quantité et en qualité suffisantes pour l'utilisation prévue.

Un système de collecte de l'eau consiste essentiellement en une surface de captage, qui peut être constituée de surfaces naturelles ou artificielles (ou d'une combinaison des deux) et en une installation de stockage de l'eau. Il existe, comme on peut s'y attendre, de nombreuses configurations possibles. La stratégie retenue dépend d'un certain nombre de contraintes, telles que :

- la quantité et la qualité de l'eau nécessaire pour satisfaire les besoins ;
- la quantité, la répartition saisonnière et la variabilité des précipitations ;
- les matières premières, la main-d'oeuvre et l'équipement disponibles ;
- les dispositions à prendre pour l'entretien ;
- l'acceptation de la communauté locale.

De nombreux systèmes de collecte de l'eau ont été installés dans les régions arides du monde. Bien que nombre d'entre eux en soient au stade expérimental, la plupart ont été des succès. On peut en trouver des exemples au Mexique, en Inde, en Croatie et d'autres sont actuellement planifiés et exécutés ailleurs.

Un aspect connexe de la collecte de l'eau encore tout nouveau est la collecte de la rosée, qui constitue une importante source d'eau dans des zones comme le Sud Ouest marocain.

Il est à noter que les systèmes de collectes de rosée sont complémentaires de la collecte de la pluie. Ils donnent un "plus" à la pluie.

Si collecte de pluie existant, un léger aménagement (peinture hydrophile par additif, ou foil +revêtement thermique) permet de récolter la rosée et le brouillard. Les bâtiments habités bénéficient en outre de climatisation passive.

Si condenseurs de rosée installés, ils collectent aussi bien pluie et petites précipitations et brouillard.

Conclusion générale

Un tiers de l'humanité vit déjà en état de stress hydrique, et parmi eux, 1,5 milliards d'habitants n'ont pas accès à l'eau potable. Le tarissement progressif des rivières et des lacs, l'abaissement de nombreuses nappes profondes surexploitées et la dégradation accélérée de la qualité de l'eau dans certaines régions du monde poussent à s'intéresser aux ressources en eau non conventionnelles. La récupération de l'eau de pluie est l'une des solutions envisageables, mais d'autres ressources moins connues ne sont pas à négliger. En effet, si l'eau liquide renouvelable sur les terres habitées atteint $12\,500\text{ km}^3$, l'eau présente dans l'atmosphère terrestre s'élève à $12\,900\text{ km}^3$. Formée pour 98% d'eau sous forme de vapeur et 2% sous forme condensée (nuages), elle pourrait devenir une ressource supplémentaire en eau potable pour de nombreuses régions du monde. Même les pays les plus chauds possèdent de l'eau dans leur atmosphère. Les techniques se développent ainsi pour récupérer l'eau contenue dans l'air sous forme de rosée ou sous forme de brouillard.

Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux de l'équipe française (ESPCI de Paris 6, CEA-Grenoble et l'Université de Corse) depuis 1999, et suite aux études préalables citées, nous conduisons parallèlement des mesures sur la formation de rosée. Nos expérimentations effectuées à travers le monde ont démontré l'efficacité et la facilité de mise en oeuvre du dispositif. L'objectif de ce travail était d'abord d'améliorer les connaissances sur les techniques déployées pour la collecte des eaux atmosphériques (rosée et brouillard) comme ressources alternatives ou complémentaires aux problèmes de carence en eau dans les régions semi-aride et aride.

Contrairement à la récupération des brouillards par des filets, qui ne peut se faire que dans certaines régions très humides et en altitude, la formation de rosée peut être importante même en atmosphère relativement sèche, comme dans les déserts continentaux. Les quantités d'eau de rosée qu'on peut récolter sont très inférieures à celles que collectent les filets, mais la rosée apparaît tous les jours, contrairement au brouillard.

La première partie de cette thèse a consisté à mettre en place une étude de potentiel de la rosée. Pour cela, nous avons développé un protocole expérimental basé sur un système de collecte composé d'un condenseur radiatif d' 1 m^2 constitué d'un matériau à bas coût (OPUR) pour favoriser la condensation de l'eau à sa surface, il est dopé avec des microbilles d'oxyde de titane et de sulfate de baryum. Ces dernières émettent naturellement des radiations infrarouges. Un isolant thermique est ajouté sous le film : plaques de polystyrène, et diverses sondes mesurant les conditions météorologiques favorisant la condensation de l'eau (température

ambiante, hygrométrie, température du point de rosée, direction et vitesse du vent, nébulosité). Les rendements obtenus dépendent des conditions météorologiques du site de mesure : à Mirleft ils peuvent atteindre $0,4 \text{ L.m}^{-2}$. On a également développé des modèles de la condensation de la vapeur d'eau afin de définir, pour un site donné, un modèle de prédiction de cette ressource. Il nous est désormais possible de construire des prédictions de rosée pour un site si l'on connaît ses caractéristiques météorologiques simples (température ambiante, humidité relative, vitesse du vent, nébulosité). En effet, cette modélisation nous a aidé à déterminer la rosée dans une quinzaine de sites. Une analyse spatio-temporelle du rendement de la rosée et de l'humidité relative nous a donné une idée sur le phénomène de la condensation à l'échelle du Maroc. Cette recherche nous a permis de parler d'une relative originalité régionale de ces paramètres qui changent durant les mois étudiés.

Dans la deuxième partie, on a réalisé des études chimiques et biologiques sur la rosée. Plusieurs dizaines d'échantillons d'eau de rosée issus des condenseurs radiatifs et d'eau de pluie ont été analysés (à Mirleft et d'autres régions du monde). Les eaux de rosée recueillies se sont révélées potables selon les normes de qualité imposées par l'Organisation Mondiale de la Santé et la directive européenne en vigueur.

Enfin, un important savoir faire a été accumulé au cours de ce travail de thèse. Tout d'abord, de nouvelles procédures et systèmes de mesures automatisés en l'absence de contrôle humain ont été mis au point. Une station a été installée en autonomie à Mirleft. Des condenseurs standard avec foil ou de tôle peinte (peinture radiative expérimentale) sur laquelle plus de 92 % du volume d'eau s'écoule par entraînement gravitaire ont été installés dans le village d'Idoussakssou et ont permis d'augmenter les ressources en eau existantes. Il s'agit de fournir de l'eau en quantité et en qualité suffisantes pour l'utilisation prévue.

« La récupération de la vapeur d'eau atmosphérique pour les besoins des humains qui n'a pas encore été exploitée à grande échelle, pourrait donc devenir une réalité dans le futur. Bien que la quantité d'eau récupérée à l'heure actuelle reste marginale, l'intérêt de cette méthode réside dans la possibilité d'obtenir de l'eau même dans les régions sèches, y compris les déserts. Peut-être trouvera-t-on un jour un procédé optimal de condensation pour que notre eau devienne bon marché et écologique » (Beysens et al 2000).

Références bibliographiques

Agoumi A., Debbarh A., 2005 Ressources en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement (1955-2005). Rapport national du développement humain- 2005.

Agoussine M. Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Guelmim (Anti-Atlas occidental marocain). Modélisation et gestion des ressources en eau souterraines. Thèse 3^{ème} cycle, université Cadi Ayyad, Marrakech, 1993, 180 p.

Al Obaidy M. Himanshu Joshi H., 2006. Chemical composition of rainwater in a tropical urban area of northern India. *Atmospheric Environment* 40 (2006) 6886–6891.

Ali, K., Momin, G.A., Tiwari, S., Safai, P.D., Chate, D.M., Rao, P.S.P., 2004. Fog and precipitation chemistry at Delhi, north India. *Atmospheric Environment* 38, 4215–4222.

Applin, K.R., Jersak, J.M., 1986. Effects of airborne particulate matter on the acidity of precipitation in central Missouri. *Atmospheric Environment* 20, 965–969.

Awanou Cossi N. and Hazoume R.P., (1997). Study of natural condensation of atmospheric humidity. *Renewable Energy* 10 (1), 19-34

Báez A., Belmont R., García R., Padilla H. et Torres M.C., 2007. Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmospheric Research* 86 (2007) 61–75.

Baez A.P., Belmont R.D., García R.M., Torres M.C.B. et Padilla H.G., 2006. Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico. *Atmospheric Research* 80 (2006) 67–85.

Bagnouls, F. & Gaussen, H. (1953) : Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat.* 88, Toulouse, pp. 193-239.

Barrie L. A. & Schemenauer R. S. (1989). Wet deposition of heavy metals. Control and fate of atmospheric trace metals. J. M. Pacyna and B. Ottar, Kluwer Academic Publishers. 268: 203-231.

Berdahl P., 1995. Building energy efficiency and fire safety aspects of reflective coatings. *Energy and buildings* 22, 187 – 191.

Berger X. A simple model for computing the spectral radiance of clear skies. *Solar Energy* 40, p. 321-333, 1988.

Berger X. Bathiebo J. Kieno F. Awanou CN. Clear sky radiation as a function of altitude. *Renewable Energy* 1992 ; 2 : 139-57.

Berkowicz S., Beysens D., Milimouk I. Heusinkveld, Muselli M., Wakshal E., Jacobs A., (2004). Urban dew collection under semi-arid conditions: Jerusalem. Proceedings of the Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Cape Town, South Africa, October 11 - 15, 2004.

Bernard R., Menguy G., Schwartz G., 1980. Le rayonnement solaire. Conversion Thermique et Applications. *Paris; Ed. techniques et Documentations, 1980, 255 p.*

Berner E.K. et Berner R.A., 1996. Global environnement. Prentice Hall édit., Englewood Cliffs, 387 p.

Berthelot, M. (2004) : *Classification des ambiances climatiques à Tours (Parçay-Meslay) et interprétations des situations météorologiques moyennes*. Note d'étude dans le cadre d'une thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours, 29 pages.

Beysens D, Gioda A, Katiushin E, Milimouk I, Morel JP, Nikolayev V. (1996b). Los pozos de rocío, un sueño reflatado. *Mundo Científico* 1996b ; 170 : 620-3.

Beysens D, Milimouk I, Nikolayev V. (1998). Dew recovery : old dreams and actual results. In : *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection*. Vancouver (Canada) ; 19-24 July 1998 : 269-72.

Beysens D., (2006b). Dew nucleation and growth. *C. R. Physique* 7, 1082–1100.

- Beysens D., Clus O., Mileta M., Milimouk I., Muselli M., Nikolayev V., (2007a). Collecting dew to improve water resources: the D.E.W. project in Biševo (Croatia). *Energy* 32, (6), 1032-1037.
- Beysens D., Milimouk I., (2000). Pour des ressources alternatives en eau. *Sécheresse* 2000, 11 (4) : 281-8.
- Beysens D., Milimouk I., Nikolayev V., Muselli M., Marcillat J., (2003). Using radiative cooling to condense atmospheric vapour: A study to improve water yield, *Journal of Hydrology*, 276, 1-11.
- Beysens D., Muselli M., Milimouk I., Ohayon C., Berkowicz S., Soyeux E., Mileta M. and Ortega P. Application of passive radiative cooling for dew condensation. *Energy*, in press. 31, (13), 2303-2315 (2006).
- Beysens D., Muselli M., Nikolayev V., Narhe R., Milimouk I., (2005a). Measurement and modeling of dew in Island, coastal and Alpine areas, *Atmospheric Research*, 73(1-2):1-22.
- Beysens, D., 1995. The formation of dew. *Atmospheric Research* 39, 215–237.
- Beysens, D., C.Ohayon, M.Muselli and O.Clus. 2006. Chemical and biological characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bordeaux, France). *Atmospheric Environment* 40 (2006) 3710-3723.
- Beysens, D., Milimouk, I., Nikolayev, V., Berkowicz, S., Muselli, M., Heusinkveld, B., Jacobs, A.F.G., 2006a. Comment on “The moisture from the air as water resource in arid region: hopes, doubt and facts” by Kogan & Trachtman”. *Journal of Arid Environments* 67, 343–352.
- Bouchaou L. Fonctionnement des aquifères karstiques et leur relation avec les aquifères de la plaine : cas de l’Atlas de Beni Mellal et de la plaine du Tadla (Maroc). Thèse Doct. d’État, université Cadi Ayyad, faculté des Sciences, Marrakech-Semlalia, 1995, 154 p.
- Brunt D. Notes on radiation in the atmosphere. *QJR Meteorology Society*, vol. 58, p. 389-420.
- Bzioui M. Politique et stratégies de gestion des ressources en eau au Maroc. Académie du Royaume du Maroc. Session « La politique et la sécurité alimentaire du Maroc à l’aube du xxie siècle » 20-21-22 novembre 2000, Rabat, 2000, 60 p.
- Casado, H., Encinas, D., Lacaux, J.P., 1992. The moderating effect of the Ca⁺² ion in the acidity in precipitation. *Atmospheric Environment* 26, 1175.
- Cecilia A., Romeo I.O. et Mihalopoulos N., 2007. Chemical composition of rainwater in the northeastern Romania, Iasi region (2003–2006). *Atmospheric Environment* 41 (2007) 9452–9467.
- Cereceda P., Larrain H., P.Lázaro P., Osses P., Schemenauer R.S., Borojevic X. 2000. La niebla, agua potable para zonas rurales. *Revista Terra Australis*. Chile. Vol.45. pp. 143-160.
- Cereceda P., Schemenauer R.S., 1998. Fogwater collection at El Tofo, Chile and other coastal sites in South America and Arabia. 1st International Conference on Fog and Fog Collection. IDRC, Vancouver, Ottawa, Canada. pp. 409-411.
- Cereceda P., Schemenauer R.S., Suit M. 1992. An alternative water supply for Chilean coastal desert villages. *Water Resources Development*. Vol.8 (1). Geobase, Elsevier. pp. 53-59.
- Chahine M., (1992). The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 359, 373-380.
- Chaix C. (2002) Etude des microclimats et des phénomènes atmosphériques hivernaux de montagne. Un enjeu pour l’enneigement artificiel, Mémoire de DEA, Université de Savoie section Géographie, 33 pages.
- Chang, T.Y., Kuntasal, G., Pierson, W.R., 1986. Night-time N₂O₅/NO₃ chemistry and nitrate in dew water. *Atmospheric Environment* 21, 1345–1351.

- Chaptal L. La captation de la vapeur d'eau atmosphérique. *Ann Agron* 1932 ; 4 : 540-55.
- Chaptal, L., 1932. La lutte contre la sécheresse-la captation de la vapeur d'eau atmosphérique. *Nature (Paris)* 60, 449– 454.
- Chiwa, M., Oshiro, N., Miyake, T., Nakatani, N., Kimura, N., Yuhara, T., Hashimoto, N., Sakugawa, H, 2003. Dry deposition washoff and dew on the surfaces of pine foliage on the urban- and mountain-facing sides of Mt. Gokurakuji, western Japan. *Atmospheric Environment* 37, 327–337.
- CLUS O., 2007. Condenseurs radiatifs de la vapeur d'eau atmosphérique (Rosée) comme source alternative d'eau douce. Thèse soutenu le 10-04-2007 à l'Université de Corse Pasquale Paoli, Faculté des sciences et technique.
- Clus, O., P. Ortega, M. Muselli, I. Milimouk, D. Beysens, (2006). Dew formation and collection in a humid tropical climate (French Polynesia). *Journal of hydrology*, submitted.
- CNRS Berkowicz S., Beysens D., Milimouk I. Heusinkveld, Muselli M., Wakshal E., Jacobs A., (2004). Urban dew collection under semi-arid conditions: Jerusalem. *Proceedings of the Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, Cape Town, South Africa, October 11 - 15, 2004.
- Conseil supérieur de l'eau (CSE). 9^e session, Agadir, 19-20 mars 2001 : Stratégie de la météorologie face aux préoccupations nationales, 81 p. Plan directeur pour le développement des ressources en eau des bassins du Souss-Massa, 96 p. Plan directeur pour le développement des ressources en eau des bassins du Tensift, 99 p. La gestion de l'économie de l'eau, 111 p.
- Conseil supérieur de l'eau (CSE). L'économie de l'eau dans le secteur de l'irrigation. 6^e session, janvier 1992 ; 80 p.
- Conseil supérieur de l'eau et du climat (CSEC), 2001.
- D'Agaro P., Croce G., Cortella G., (2006). Numerical simulation of glass doors fogging and defogging in refrigerated display cabinets. *Applied thermal engineering* 26, 1927-1934.
- Daguenet M. Les séchirs solaires : théorie et pratique, *UNESCO*, 1985.
- Das, R., Das, S.N., Misra, V.N., 2005. Chemical composition of rainwater and dustfall at Bhubaneswar in the east coast of India. *Atmospheric Environment* 39, 5908–5916.
- Davidson C. I. & Wu Y. L. (1989). Dry deposition of trace elements. Control and fate of atmospheric trace metals. J. M. Pacyna and B. Ottar, Kluwer Academic Publishers. 268: 147-202.
- De Martonne, E., (1926) : Aérisme et indice d'aridité. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 182, pp. 1395-1398.
- Draxler, R.R. et Rolph, G.D., 2003. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lafrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website(<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- El Hebil A. Problématique de gestion et d'exploitation des eaux souterraines. Colloque national sur le forage d'eau. Rabat : Ministère de l'Équipement, Administration de l'hydraulique, 1987 ; 10 p. EL Morjani Z.EA., 2002. Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). *Thèse N° 3370* présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Genève 2002.
- Emberger, L. (1930) : Sur une formule applicable en géographie botanique. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, pp 191-389.
- Es Sami H. La nappe libre du Souss (sud marocain) : impact de la sécheresse et de la surexploitation. DESS, université de Besançon, 1994, 78 p.
- Fortin, V., Ouarda, T., Rasmussen, T.P. et Bobée, B., (1997). Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. *Revue des Sciences de l'Eau*, 4 : pp. 461-487.

- Gandhidasan P. and Abualhamayel H.I., (2005). Modelling and testing of a dew collection system. *Desalination* 180, 47-51.
- Garratt, J.R. and M.Segal. 1988. On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. *Boundary-Layer Meteorol.*, 45:209–236.
- Gindel I. Irrigation of plants with atmospheric water within the desert. *Nature* 1965; 5002: 1173-5.
- Gioda A. Acosta Baladon A. Fontanel P. Hernandez Martin Z. Santos A. L'arbre fontaine. *La Recherche* 1992 ; 249 : 1400-8.
- Gioda A. Acosta Baladon A. L'importance des précipitations occultes sous les tropiques secs. *Sécheresse* 1991 ; 2 : 132-5.
- Gioda A. Espejo R. Blot J. Neuvy O. Arbres fontaines, eau du brouillard et forêts de nuages. *Sécheresse* 1994 ; 5 : 237-43.
- Goody R.M., Atmospheric radiation, Clarendon Press, Oxford (1964).
- Guyer E.C., Brownell D.L., (1999). Handbook of Applied Thermal Design, 1st edition. Pub. Taylor and Francis. Book, 600p
- Guyot G., (1999). Climatologie de l'environnement, 2d édition, Dunod France, book, 507p.
- Gyot G. et Hanocq J.F., (1974)
- Hecht-Nielsen, R., (1990). Neuro-computing, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA. Solution for a distributed hydrological model and applications, pp. 89-93.
- Hopman F. Untested ideas on a watering device for arid climates. *Southwest Bull, N Mexico Solar Energy Ass* 1978, 5 : 15.
- Hufty A. : *Introduction à la climatologie. Les presses de l'Université Laval, 2001.*
- Jacobs A.F.G., Heusinkveld B.G., Berkowicz S., (2004). Dew and Fog Collection in a Grassland Area, The Netherlands. Proceedings: Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Cape Town, South Africa
- Jiries, A. 2001. Chemical composition of dew in Amman. *Atmospheric Research*, 37:261-268.
- Jukov, N.N., 1931. O drevnih gydrotehnikeskikh sooruzeniyah goroda Fodosii v sviazi s voprosom ob izuchenii principov dobychi vlagi iz atmosfery. Feodosijskoie otdelenie obshchestva po izucheniu Kryma i arheologicheskij muzej, Sbornik statej po ekonomike, bytu i istorii Feodosijskogo rajona, Vol. 1, Feodosia, (in Russian); translated in French by Milimouk I., Beysens D., 1995. Recueil d'articles sur la condensation de l'eau atmosphérique. Rapport CEA-Saclay, DIST 95002495, pp. 68–74.
- Jumikis AR. Aerial wells: secondary sources of water. *Soil Sci* 1965;100:83–95.
- Keene, W.C., Pszenny, A.P., Galloway, J.N., Hawley, M.E., 1986. Sea salt corrections and interpretations of constituent ratios in marine precipitation. *Journal of Geophysical Research* 91, 6647–66 58.
- Khemani, L.T., Momin, G.A., Naik, M.S., Prakasa Rao, P.S., Kumar, R., Ramana Murthy, Bh.V., 1985. Impact of alkaline particulates on pH of rainwater in India. *Water, Air and Soil Pollution* 24, 365–376.
- Kieser M., Edler G., Daponte T., Leon F., Verschaeren P., Corneel M., (2002). Agricultural method and materials for screening solar radiation. US Patent 6441059, Aug 2002.
- Knapen, M.A., 1929. Dispositif intérieur du puits aérien Knapen. Extrait des mémoires de la société des ingénieurs civils de France (Bull. Jan.– Feb. 1929). Imprimerie Chaix, Paris.
- Kulshrestha, U.C., Sarkar, A.K., Srivastava, S.S., Parashar, D.C., 1996. Investigation into atmospheric deposition through precipitation studies at New Delhi (India). *Atmospheric Environment* 30 (24), 4149–4154.

L'Hirondel J. et J-L. 1996. *Les nitrates et l'homme, le mythe de leur toxicité*, les éditions de l'institut de l'environnement, 142p.

Lenoble J., 1993. Atmospheric radiative Transfer, A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA (1993).

Liou, K.N., 1980. An introduction to atmospheric radiation, Academic Press (1980).

Liu J., Aizawa H., Yoshino H., (2004). CFD prediction of surface condensation on walls and its experimental validation. *Building and Environment*, 39, 905-911.

Muselli M., Beysens D., Milimouk I. A comparative study of two large radiative dew water condensers 2006: *Journal of Arid Environments* 64 (2006) 54–76.

Muselli M., Beysens D., Marcillat J., Milimouk I., Nilsson T., Louche A., 2002 : Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France). *Atmospheric Research* 64 (2002) 297–312.

Muselli, M., Beysens, D., Soyeux, E., 2006. Is dew water potable? Chemical and biological analyses of dew water in Ajaccio (Corsica Island, France). *Journal of Environmental Quality* accepted for publication.

Malardel S., Fondamentaux de météorologie à l'école du temps. CEPADUES-EDITIONS, Toulouse, France. N° éditeur : 631,

Margat J. Analyse de la situation due aux effets de la sécheresse et recommandations de mesures appropriées à leur atténuation par l'exploitation des eaux souterraines. Rapport de mission dans la province d'Errachidia et Ouarzazate. Note BRGM. S.I : s.n, 1983 ; 15 p.

McCulloch, W.S. and Pitts, W., (1943). A logical Calculus of the Ideas Imminent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5: pp. 115-133.

Mezino J. Gisement solaire de la Réunion. *Thèse Sci., Université Paris VI, 1985.*

Mileta M., Beysens D., Nikolayev V., Milimouk I., Clus O., Muselli M., (2006). Fog and dew collection projects in Croatia. Proceedings of the "International Conference on Water Observation and Information System for Decision Support", Ohrid, Republic of Macedonia - 23, 26 May 2006.

Mileta M., Muselli M., Beysens D., Milimouk I., Berkowicz S., Heusinkveld B.G. and Jacobs A.F.G., (2004). Comparison of dew yields in four Mediterranean sites: Similarities and differences. Proceedings: Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, Cape Town, South Africa.

Milimouk I, Beysens D. Recueil d'articles sur la condensation de l'eau atmosphérique. *Rapport CEA-Saclay* 1995 ; DIST 95002495.

Ministère de l'Agriculture, de l'équipement et de l'environnement (MAEE) – Département de l'équipement. « Les grands barrages du Royaume », 1998. Ministère de l'aménagement du territoire (MAT), de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement, « État de l'environnement du Maroc »; 2001

Ministère de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement, (MATUAE) 2001a. « Vulnérabilité du Maroc face aux changements climatiques » Étude réalisée dans le cadre du projet PNUD-FEM RAB94G31.

Ministère de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement, 2001b. « Communication Nationale Initiale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques » Ministère en charge de l'environnement-Maroc (MCE), 1998. « L'eau et les Changements Climatiques au Maghreb » ouvrage réalisé dans le cadre du projet PNUDFEM RAB 94G31. Monteith J.L., Unsworth M.H., 1990. Principles of Environmental Physics, second ed. Routledge, Chapman & Hall, Inc., New York.

Monteith J.L., Unsworth M.H., 1990. Principles of Environmental Physics, second ed. Routledge, Chapman & Hall, Inc., New York.

- Monteith, J.L. 1957. Dew. *Q. J. Royal Meteorol. Soc.* 83: 322-341.
- Mulawa, P.A, S.H.Cadle, F.Lipari, CC.Ang and R.T. Vandervennet, 1986. Urban dew: Its composition and influence on dry deposition rates. *Atmospheric Environment*, 20:1389-1396.
- Munger, J.W., 1982. Chemistry of atmospheric precipitation in the north-central United States: influence of sulphate, nitrate, ammonia, and calcareous soil particulates. *Atmospheric Environment* 16, 1633–1645.
- Najjar, Y and Ali, H., (1998a). On the Use of BPNN in Liquefaction Potential Assessment Tasks. *Artificial Intelligence and Mathematical Methods in Pavement and Geomechanical Systems*, Attoh-Okine (Editor): pp. 55-63.
- Najjar, Y. and Ali, H., (1998b). CPT-Based Liquefaction Potential Assessment : A Neuronet Approach. *ASCE Geotechnical Special Publication No.75*, Dakoulas, P. et. Al. (Editors), (1) : pp. 542-553.
- Najjar, Y. and Zhang, X., (2000). Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. *ASCE Geotechnical Special Publication No. 96*, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors) : pp. 43-57.
- Nikolayev V, Beysens D, Gioda A, Milimouk I, Katiushin E, Morel J- P. Water recovery from dew. *J. Hydrology* 1996;182:19–35.
- Nikolayev V., Beysens D., Gioda A., Milimouk I., Katiushin E., Morel J. P., (1996). Water recovery from dew. *Journal of hydrology* 182, 19-35
- Nikolayev V.S., Beysens D., Muselli M., (2001). A computer model for assessing dew/frost surface deposition. *Proceedings of the Second International Conference on Fog and Fog Collection, St John's (Canada) July 2001* Eds.R.S. Shemenauer and H. Puxbaum, IRDC, 333 – 336
- Nilsson T, 1996. Initial experiments on dew collection in Sweden and Tanzania. *Sol. Energy Mat. Sol. Cells.* 40:23-32.
- Nilsson T. M., (1994). *Optical Scattering properties of Pigmented Foils for Radiative Cooling and Water Condensation: Theory and Experiment.* Chalmers University of Technologie, Göteborg, Sweden. PhD
- Nilsson T., W.E.Vargas, G.A.Niklasson and C.G.Granqvist, 1994. Condensation of water by radiative cooling. *Sol. Energy*, 5(f):310-317.
- Norman J.M., et Becker F., 1995. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Remote Sensing Reviews*, 12, 159-173.
- Okochi H.,T.Kajimoto, Y.Arai and M.Igawa, 1996. Effect of acid deposition on urban dew chemistry in Yokohama, Japan. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 69:3355-3365.
- Olivier J., De Rautenbach C.J., 2002. The implementation of fog water collection systems in South Africa. *Atmospheric Research.* Elsevier. 64. pp. 227-238.
- ONEP 2004. « Le dessalement au Maroc – Réalisations et Perspectives » Rapport établi par l'ONEP – 2004.OPUR : www.opur.u-bordeaux.fr
- OPUR, 2000: www.opur.u-bordeaux.fr
- Pedro, M.J., Gillespie, T.J., 1982a. Estimating dew duration. I. Utilising micrometeorological data. *Agricultural Meteorology* 25, 283–296.
- Pedro, M.J., Gillespie, T.J., 1982b. Estimating dew duration. II. Utilising standard weather station data. *Agricultural Meteorology* 25, 297–310.
- Pied J.P., (1978). Method for increasing the productive yield of crops with polyolefin films. US Patent 4075784, feb 1978.
- Pierson, W.R. and W.W.Brachaczek, 1990. Dew chemistry and acid deposition in Glendora, California, during the 1986 Carbonaceous species methods comparison study. *Aerosol Science and Technology*, 12:8-27.

- Pierson, W.R., W.W. Brachaczek, R.A.Gorse, S.M.Japar and J.M.Norbeck, 1986. On the acidity of dew. *Journal of Geophysical Research*, 91, D3: 4083-4096.
- Pierson, W.R., W.W.Brachaczek and S.M.Japar, 1988. Dry deposition and dew chemistry in Claremont, California, during the 1985 Nitrogen species methods comparison study. *Atmospheric Environment*, 22:1657-1663.
- Riley, J.P., Chester, R., 1971. *Introduction to Marine Chemistry*. Academic Press, London and New York.
- Rodier, J., 1996. *L'analyse de L'eau: Eaux Naturelles, Eaux Re´sidiuaires, Eau de Mer*. 8e e´dition. Dunod, Paris, 1365p.
- Ronseaux F. and Delmas R.J., Chemical composition of bulk atmospheric deposition to snow at Col de La Brenva (Mt Blanc area), in *Acid Deposition at High Elevation Sites*, edited by M.H. Unsworth and D. Fowler, Kluwer Academic Publishers, 491-510, 1988.
- Rubio, M.A., E.Lissi and G.Villena, 2002. Nitrite in rain and dew in Santiago City, Chile. Its possible impact on the early morning starts of the photochemical smog. *Atmospheric Environment*, 36:293-297
- Sceller, E. 2003. Amino-acids in dew – origin and seasonal variation. *Atmospheric Environment*, 35, 2179-2192.
- Schemenauer R.S., Cereceda P., 1991. Fog-water collection in arid coastal locations. *Ambio*. Vol. 20 (7). Geobase, Elsevier. pp. 303-308.
- Schemenauer R.S., Cereceda P., 1992. The quality of fog water collected for domestic and agricultural use in Chile. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 31 (3). Geobase, Elsevier. pp. 275-290.
- Schemenauer RS. Cereceda P. Suit M. An alternative water supply for Chilean coastal desert villages. *Water resources Development* 1992 ; 8 : 53-9.
- Schemenauer RS. Fuenzalida H. Cereceda P. A neglected water resource : the camanchaca of South America. *Bull Amer Meteor Soc* 1988 ; 69 : 138-47.
- SECE, 2004. « Données relatives au secteur de l'eau ». Communication de la part du secrétariat d'état chargé de l'eau 2004.
- Sharan G., (2006). Dew Harvest To Supplement Drinking Water Sources in Arid Coastal Belt of Kutch. Centre for Environmental Education, India. Book.
- Sharan G., Beysens D., Milimouk I., (2007). A Study of dew Water Yields on Galvanized Iron roof in Kothara (North-West India). *Journal of Arid Environment*, 69, 259–269.
- Thornthwaite, C.W. (1948) : An approach toward a rational classification of climate. *Geograph.Rev.* 38, pp. 55-94.
- Vargas WE, Lushiku EM, Niklasson GA, Nilsson TMJ. Light scattering coatings : Theory and solar applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 1998 ; 54 : 343-50.
- Vargas William E., Greenwood P., Otterstdt J.E., Niklasson G.A., (2000). Light scattering in pigmented coatings: experiments and theory. *Solar Energy*, 6, 553-561.
- Varma, G.S., 1989. Impact of soil derived aerosols on precipitation acidity in India. *Atmospheric Environment* 23, 2723–2728.
- Wagner, G., Steele, K., Peden, M., 1992. Dew and Frost Chemistry at a Midcontinental Site, United States. *J. Geophys. Res.* 97, 20591–20597.
- Wahlren R.V., (2001). Atmospheric water vapour processor designs for potable water production: a review. *Water Research*, 35 (1), 1-22.
- WHO: Draft third edition of the WHO Guidelines for Drinking- Water Quality (web) http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/guidelines3rd/en/.
- Zhang G.S., Zhang J. et Liu S.M., 2007. Chemical composition of atmospheric wet depositions from the Yellow Sea and East China Sea. *Atmospheric Research* 85 (2007) 84–97.

Zhang M.S.W., Wang S., Wu F., Yuan X. et Zhang Y., 2007. Chemical compositions of wet precipitation and anthropogenic influences at a developing urban site in southeastern China. *Atmospheric Research* 84 (2007) 311–322.

Zhao H., Beysens D., (1995). From Droplet Growth to Film Growth on a Heterogeneous Surface: Condensation Associated with a Wettability Gradient. *Langmuir* 1996,11, 627-634.

ANNEXE : LOIS GENERALES DU RAYONNEMENT

A.1. Loi des corps noirs, origine du rayonnement

En 1900, le physicien Max Planck présenta ses recherches décrivant l'émission et l'absorption de chaleur / lumière par les corps noirs. Toute molécule constitutive d'un corps émet un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est déterminée par la nature de la liaison chimique mise en jeu tandis que la puissance émise à cette longueur d'onde est fonction de la température du corps. En regard de ce principe, un corps noir est un matériau (théorique) particulier qui absorbe parfaitement toute l'énergie radiative qu'il reçoit. De même le corps noir est un radiateur parfait en vertu de quoi son absorption (a) tout comme son émissivité (ε) sont égales à 1. Le corps noir émet une énergie dont la puissance $E_{cn}(\lambda)$ ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) et la distribution spectrale sont données par la loi de Planck :

$$E_{cn}(\lambda) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \quad (1)$$

λ = longueur d'onde (m)

T = température du corps noir (K)

$C_1 = 2\pi c^2 h = 3.742 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2}$

$C_2 = ch k^{-1} = 1.439 \cdot 10^4 \text{ W } \mu\text{m K}$

$h = 6.6255 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$; constante de Planck

$k = 1.3805 \cdot 10^{-23}$; constante de Boltzmann

$c = 2.996 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; célérité des ondes électromagnétiques dans le vide

Rappelons certaines propriétés optiques utiles à la compréhension du rayonnement :

Albédo c'est une grandeur sans dimension, rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface à l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps sans aucune réflexion, et 1 au miroir parfait, pour un corps diffusant dans toutes les directions et n'absorbant rien du rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit.

Absorption (a) : Mesure du phénomène physique qui revient pour un corps à absorber un rayonnement en augmentant d'autant son énergie interne. C'est le quotient du rayonnement quelconque absorbé par un corps sur la quantité de rayonnement incident sur ce même corps.

Soit $a = I / I_0 = 1 - R - T$ (sans dimension, $0 < a < 1$), où I est l'intensité du rayonnement absorbé, I_0 l'intensité du rayonnement incident, R est la réflectance et T est la transmittance.

Absorbance (A) : Grandeur quantifiant l'atténuation d'un rayonnement lumineux à travers un corps. A est souvent calculée expérimentalement selon des formules variant en fonction de la discipline scientifique.

Emittance ou Emission ou Radiance (E) : quantité de rayonnement émis par un corps à une température donnée par unité de surface (W m^{-2}).

Emissivité (ϵ) : c'est le quotient du rayonnement émis (radiance) par un corps quelconque sur l'émission (ou radiance) correspondante d'un corps noir à la même température. L'absorption est égale à l'émissivité pour des corps à température constante, $\epsilon = a = 1 - R - T$ (sans dimension, $0 < \epsilon < 1$).

Réflectance ou Réflexion (R) : proportion du rayonnement total incident sur un corps qui est réfléchi par ce corps (exprimé sans dimension, $0 < R < 1$ ou en %). La réflexion spéculaire caractérise le rayonnement réfléchi avec un angle à la normale identique à l'angle d'incidence et dans le plan décrit par le rayon incident et la normale. La réflexion diffuse caractérise toute réflexion non spéculaire.

Transmittance ou Transmission (T) : Proportion du rayonnement total incident sur une face du corps qui traverse ce corps sans être absorbée (exprimé sans dimension, $0 < T < 1$ ou en %). La transmission spéculaire pour un dioptre plan caractérise le rayonnement transmis dans une direction parallèle au rayon entrant. La transmittance diffuse caractérise toute transmission de direction non spéculaire.

Absorption, Emissivité, Réflectance et Transmittance peuvent être **spectrales** (le quotient de la valeur a , ϵ , R ou T à une longueur d'onde spécifique ou pour une bande spectrale très mince sur celle du corps noir à la même température) ou bien **totales** (le quotient de la valeur a , ϵ , R ou T intégrée pour tout le spectre sur celle du corps noir à la même température).

Corps Noir (CN) : Un corps a la propriété de corps noir sur une plage spectrale si il absorbe l'intégralité du rayonnement électromagnétique qu'il reçoit. Le corps noir est aussi un radiateur parfait sur cette plage spectrale, a et ϵ sont égales à 1.0 et le spectre d'émission suit la loi de Planck.

Corps gris : c'est un corps dont l'émissivité est constante (égale pour toutes les longueurs d'onde) sur tout le spectre (< 1).

TYPE DE SURFACE	AUTRES CARACTERISTIQUES	ALBEDO	EMISSIVITE
Métal poli	-----	0.90-0.99	0.01-0.10
Eau	Faible angle zénithal de visée	0.03-0.10	0.92-0.97
	Fort angle zénithal de visée	0.10-0.50	0.92-0.97
Neige	Ancienne	0.40-0.70	0.82-0.89
	Fraîche	0.45-0.95	0.90-0.99
Glace	De mer	0.30-0.40	0.92-0.97
	De glacier	0.20-0.40	-
	Sec	0.35-0.45	0.84-0.90
Sable nu	Humide	0.20-0.30	0.91-0.95
	Argileux sec	0.20-0.35	0.95
Sol nu	Argileux humide	0.10-0.20	0.97
	Sol humide avec chaumes	0.05-0.07	-
Surface artificielle	Béton	0.17-0.27	0.71-0.88
Surface agricole	Route goudronnée	0.05-0.10	0.88-0.95
	Prairies	0.16-0.26	0.90-0.95
	Cultures : blé, riz,...	0.10-0.25	0.90-0.99
	Vergers	0.15-0.20	0.90-0.95
Forêts	A feuilles caduques	0.10-0.20	0.97-0.98
	Conifères	0.05-0.15	0.97-0.99

Tableau A.1. Propriétés radiométriques des surfaces naturelles (adapté de Arya, 1988)

La majeure partie de l'énergie reçue par la Terre provient de l'irradiation solaire qui émet un spectre équivalent à celui d'un corps noir de température 5777 K (d'après Iqbal, 1983). Or la température moyenne à la surface du globe peut être considérée comme relativement stable et constante à l'échelle des temps géologiques. Cela signifie que la Terre et son atmosphère qui émettent comme un corps noir à température ambiante (longues longueurs d'onde thermiques), dissipent à leur tour autant d'énergie radiative dans l'espace qu'elles n'en absorbent du soleil dans le même temps. Cela correspond environ à 70% de l'insolation moyenne reçue (l'albedo pour le spectre solaire à la surface terrestre étant considéré voisin de 0.3, voir à ce propos Kiehl J. T. and Trenberth K. E., 1997). Les composantes du rayonnement thermique reçues au sol seront donc issues de deux types de spectres bien distincts (Iqbal, 1983) qui seront détaillés par la suite :

- un spectre de courtes longueurs d'ondes radiatives thermiques (UV-VIS-proche IR) centré autour d'une longueur d'onde maximale de 0.501 μm pour le rayonnement solaire (corps noir à 5777 K), radiations diurnes uniquement.
- un spectre de grandes longueurs d'ondes radiatives thermiques (Moyen IR- Lointain IR) d'origine terrestre et centré autour d'une longueur d'onde voisine de 10 μm (corps noir voisin de 288 K), radiation diurne et nocturne.

A.2. Le spectre solaire

Source du rayonnement solaire

Au cœur de la sphère gazeuse qu'est le soleil, la réaction de fusion de 4 atomes d'hydrogène H en un hélium He accompagné d'une légère perte de masse produit une formidable énergie qui se propage aux couches externes essentiellement par transfert radiatif. Le rayonnement reçu par l'atmosphère terrestre sur la face éclairée de notre globe est émis par les 500 km externes du soleil appelés la « photosphère » dont la température est proche de 6000 K.

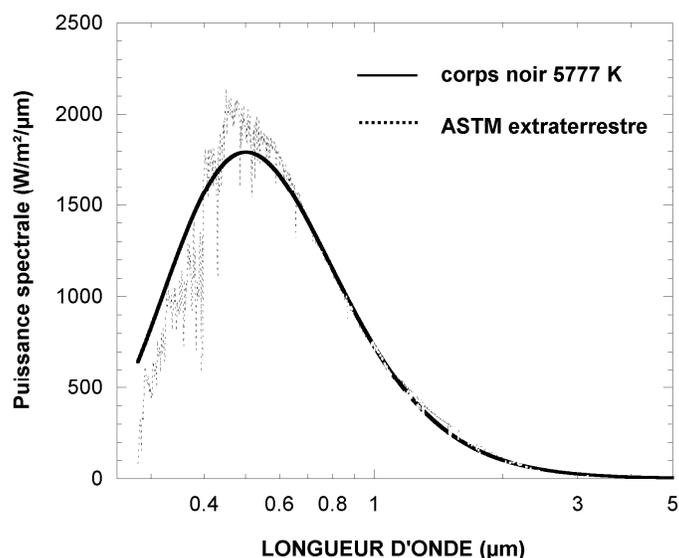


Figure A. 1. Trait plein, spectre théorique reçu par l'atmosphère si le soleil était un corps noir idéal avec une température de surface de 5777 K. Pointillés, spectre solaire extraterrestre reçu par l'atmosphère selon le standard ASTM G173-03.

La Fig. A.1 présente en courbe pointillée l'intensité lumineuse spectrale telle qu'elle serait reçue hors atmosphère si le soleil se comportait comme un corps noir de température 5777 K (considérée comme la température « efficace » du soleil selon Iqbal, 1983). Cette intensité déduite de la loi de Planck est corrigée par le facteur $(r_s/r_0)^2$ pour tenir compte de l'éloignement Terre – Soleil. $r_s = 6.9598 \cdot 10^5$ km rayon moyen du soleil ; $r_0 = 149597890$ km distance Terre – Soleil.

La courbe en trait plein représente le rayonnement solaire « extraterrestre » standard (c'est-à-dire reçu aux limites externes de l'atmosphère terrestre) tel qu'il est proposé par l'American Society for Testing and Materials (ASTM) sous la dénomination ASTM G173-03 comme Spectre de Référence Terrestre pour l'Evaluation des Performances des systèmes

Photovoltaïques (TRSPPE). Le spectre ASTM G173 a été proposé en 2003 par le Renewable Resource Data Center (RReDC, <http://rredc.nrel.gov/solar/>); voir aussi les travaux de Geymard C. A., Myers D. and Emery K., 2002. Dans le cas réel, la température de surface du soleil n'est pas uniforme et est sujette à des variations sensibles qui entraîne les écarts du rayonnement extraterrestre effectif à celui d'un corps noir à 5777 K occupant une portion de ciel identique à celle occupée par le soleil. Toutefois, la puissance radiative reçue du soleil en limite externe de l'atmosphère proposée par simulation pour le modèle ASTM G173 a été confirmée par des mesures spatiales précises poursuivies durant 24 ans. La constante solaire ainsi déterminée est de $1366,1 \text{ W m}^{-2}$.

Atténuation due à l'atmosphère

Au cours de sa propagation à travers l'atmosphère, le rayonnement solaire incident est modifié par les phénomènes de diffusion et d'absorption qui en altèrent la puissance, la distribution spectrale ainsi que la direction (Monteith J. L. and unsworth M.H., 1990). La diffusion atmosphérique du rayonnement incident est due à l'interaction des photons avec les molécules de gaz (diffusion de Rayleigh) et les aérosols en suspension dans l'air (diffusion de Mie). La diffusion de Rayleigh atténue les courtes longueurs d'onde ($< 0.55 \mu\text{m}$), ce qui confère au ciel sa teinte bleutée. La diffusion de Mie sur les aérosols affecte l'ensemble du spectre solaire, ce qui donne par exemple aux nuages leur aspect laiteux. Au sol, la fraction diffuse du rayonnement solaire varie de 10 à 90 % selon que l'atmosphère est très pure ou très chargée en aérosols (la nébulosité étant dans ce cas un facteur très important, Guyot Gérard, 1999).

L'absorption atmosphérique est due à la nature des différentes phases gazeuses, certaines molécules pouvant absorber les longueurs d'onde correspondant précisément à l'énergie d'excitation de leurs liaisons chimiques constitutives. Les molécules gazeuses à l'origine de bandes d'absorption dans le spectre solaire reçu au sol sont essentiellement H_2O et CO_2 , suivies de O_3 et O_2 dans une moindre mesure. L'atténuation du rayonnement solaire par absorption est de l'ordre de 10 à 15 % du rayonnement extraterrestre.

Dans notre cas, nous nous intéresserons principalement au rayonnement global E_{glob} reçu au niveau de la mer (rayonnement direct plus diffus E_{dif}). De manière générale, les ordres de grandeur des éclairagements pour une distance zénitale du soleil de 45° sont fonction de la nébulosité N du ciel (octas) :

- ciel clair ($N = 0/8$) : $E_{\text{glob}} \# 900 \text{ W m}^{-2}$ dont $E_{\text{dif}} \# 200 \text{ W m}^{-2}$
- ciel si $N = 4/8$: $E_{\text{glob}} \# 800 \text{ W m}^{-2}$ dont $E_{\text{dif}} \# 350 \text{ W m}^{-2}$

- ciel totalement couvert ($N = 8/8$) : $E_{\text{glob}} \# 300 \text{ W m}^{-2}$ dont $E_{\text{dif}} \# 300 \text{ W m}^{-2}$

A.3. Nature du rayonnement thermique de grande longueur d'onde

Le rayonnement atmosphérique aux grandes longueurs d'onde (Moyen IR, Lointain IR) est émis par la surface et l'atmosphère terrestre en fonction de la température de chaque élément. Le rayonnement infrarouge est émis par les vibrations des liaisons chimiques constitutives du corps (Nyquist R. et al, 1996): vibration d'élongation (oscillations de deux atomes liés, dans l'axe de leur liaison) ou bien vibration de déformation (oscillations de deux atomes liés à un troisième, produisant une variation périodique de l'angle des deux liaisons). Pour les températures ambiantes observées de jour comme de nuit à la surface de la terre, ces types de vibrations émettent un spectre IR idéal centré autour d'un maximum d'émission aux environs de $10 \mu\text{m}$ de longueur d'onde qui est représenté en trait gras sur la figure A.2 Le spectre idéal solaire reçu en haute atmosphère (émission d'un corps noir à 5777 K , trait fin) étant émis par un phénomène différent de transitions d'électrons entre niveaux d'énergie par excitation / relaxation, les spectres solaire et terrestre ne se chevauchent pas (Berdahl P., 1995).

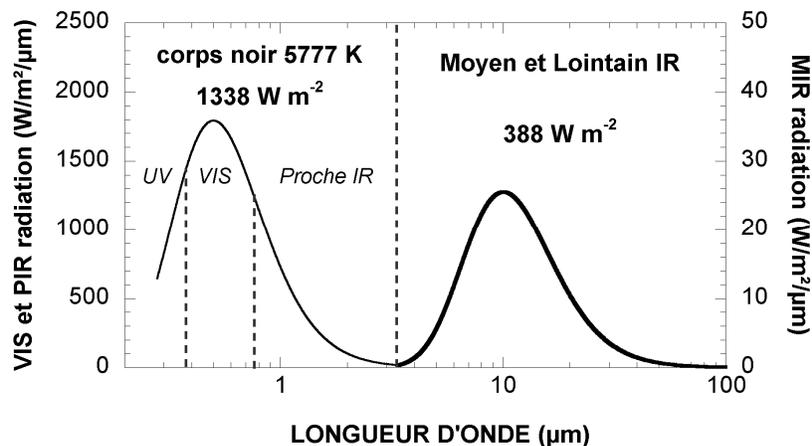


Figure A. 2. Trait fin, rayonnement solaire idéal extraterrestre tel que reçu en haute atmosphère. Trait gras, rayonnement d'un corps à température ambiante (288 K).

L'atmosphère gazeuse est relativement transparente sur le domaine spectral du rayonnement visible, elle ne laisse passer le rayonnement que dans un nombre limité de bandes spectrales Infrarouges, les « fenêtres atmosphériques ». Pour sa part, la surface terrestre se comporte pratiquement comme un corps gris dont le maximum d'émittance se retrouve vers $10 \mu\text{m}$ et dont l'émissivité totale est supérieur à 0.8 bien que dépendante de la

nature de la surface (Guyot G., 1999). Le rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par le sol et les étendues d'eau (mers, océans, lacs) est en partie absorbé par l'atmosphère, principalement par les molécules H_2O , CO_2 , O_3 et O_2 (et dans une moindre mesure par d'autres gaz à effet de serre tels que CH_4 , N_2O et CFCs, (Seinfeld J. H. and Pandis S. N., 1998, Pérez Garcia M., 2004.)). Chaque molécule de l'atmosphère réémet alors cette puissance pour des longueurs d'ondes discrétisées (en fonction de sa nature) et une puissance déterminée par sa température (et donc suivant son altitude). L'émission étant iso-directionnelle, une part de ce rayonnement se propage vers la surface terrestre constituant au sol le rayonnement IR de grandes longueurs d'ondes (aussi communément appelé « effet de serre »). La figure A.3. (a) schématise l'origine de l'énergie radiative que peut recevoir de nuit (absence du spectre solaire) une surface plane quelconque au niveau du sol et sur sa face supérieure.

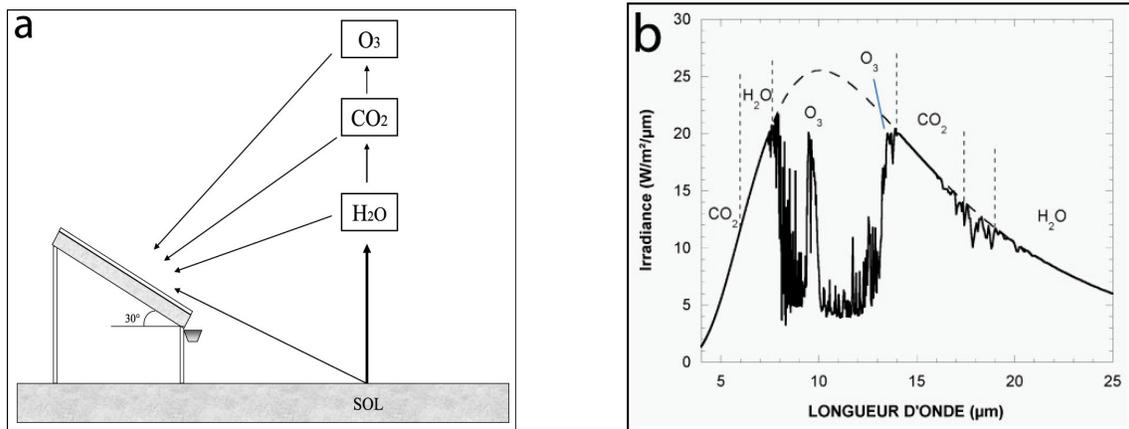


Figure A. 3. (a), origine du rayonnement IR que peut recevoir sur sa face supérieure une surface inclinée au niveau du sol. (b), caractéristiques spectrales du rayonnement IR reçu du ciel clair par un plan horizontal, avec indication des bandes d'émission des principaux gaz contributeurs à ce spectre.

Le spectre du rayonnement thermique IR émis par le ciel au niveau de la mer, figure A.2. (b), présente les bandes spectrales d'absorption maximales pour chaque molécule et qui sont à l'origine de la répartition du spectre. La bande spectrale $7.5 - 13.5 \mu\text{m}$ se distingue par une grande transparence de l'atmosphère à l'IR (plage sur laquelle le rayonnement est donc peu émis vers le sol). Dans une moindre mesure, une seconde « fenêtre atmosphérique » est observable sur la plage spectrale 16.25 à $22.5 \mu\text{m}$ (Awanou C. N., 1998). Selon Seinfeld J. H. et Pandis S. N. (1998), près de 80% de l'énergie émise par la surface terrestre sur la bande $7 - 13 \mu\text{m}$ est dissipée dans l'espace (spectre donné par Kiehl J. T. and Trenberth K. E., 1997).

Seul l'ozone présente un pic d'absorption sur cette fenêtre spectrale, mais sa très haute altitude (donc température très basse) limite l'intensité de son émittance. Tout comme O₃, les autres gaz à effet de serre hors CO₂ (CH₄, N₂O et CFCs) présentent une absorption intense sur cette bande, c'est pourquoi des variations infimes de leur concentration entraînent une variation sensible du flux radiatif.

Plusieurs formules empiriques ont été proposées pour l'estimation du flux radiatif (E_s) de grande longueur d'ondes émis par le ciel à partir des paramètres météorologiques mesuré au sol. Ainsi, E_s s'exprime en fonction de l'émittance du corps noir à température ambiante au sol T_a pondérée par l'émissivité totale du ciel ϵ_s selon la formule suivante:

$$E_s = \sigma(273 + T_s)^4 = \epsilon_s [\sigma(273 + T_a)^4] \quad (2)$$

$$E_s = \sigma(0.82 - 0.2510^{-0.007} e_a) T_a^4 \quad (3) \quad \text{Angstrom (1918)}$$

$$E_s = (0.56 + 0.08\sqrt{e_a}) \cdot \sigma \cdot (T_a)^4 \quad (4) \quad \text{Brunt (1932)}$$

$$E_s = 5.5T_a + 213 \quad (5) \quad \text{Unsworth et Monteith (1933)}$$

$$E_s = 5T_a + 200 \quad (6) \quad \text{Mézino (1985)}$$

σ Constante de Boltzman

T_a température ambiante en (°C)

T_s température équivalente du ciel (°C)

ϵ_s émissivité totale du ciel ($0 < \epsilon_s < 0.1$)

P_e ; e_a pression de vapeur d'eau

Pour la détermination de l'émissivité du ciel, diverses formules ont été proposées :

$$\epsilon_s = 1 - 0.261 \exp[-7.7710^{-4} (T_a - 273)^2] \quad (7) \quad \text{Bernard (1980)}$$

Pour la nuit, une autre relation pour estimer l'émissivité inclut l'humidité relative et l'altitude du site :

$$\varepsilon = \frac{1-N}{8} [5.7723 + 0.95555(0.6017)^2] 10^{-4} T_a^{1.1893} H_r^{0.0665} + \frac{N}{8} \left[1 - (3000 + 1751z^{0.652}) H_r^{-3/2} T_a^{-1} \right]^4 \quad (8) \text{ Dagenet (1985)}$$

Berger a proposé deux relations, selon le jour et la nuit pour la détermination de l'émissivité du ciel :

$$\varepsilon_s = 0.77 + 0.0038Td \quad \text{pour le jour} \quad (9) \quad \text{Berger (1988)}$$

$$\varepsilon_s = 0.752 + 0.0048Td \quad \text{pour la nuit} \quad (10)$$

Pour sa part, Prata proposa une formulation plus précise de l'émissivité du ciel par ciel clair grâce à un ajustement expérimental affiné de l'émissivité d'une couche atmosphérique individuelle :

$$\varepsilon_0 = 1 - \left[1 + 46.5 \left(\frac{P_e}{T_a} \right) \right] \cdot \exp \left(- \left[1.2 + 139.5 \left(\frac{P_e}{T_a} \right) \right]^{1/2} \right) \quad (11) \quad \text{Prata (1996)}$$

A.4. Refroidissement radiatif nocturne, climatisation passive diurne

Le refroidissement radiatif s'appréhende très simplement comme la somme des radiations (énergies) émises et reçues par un corps. Un corps reçoit le rayonnement solaire de courtes λ (UV-Visible-Proche IR, trait fin sur la figure suivante) ainsi que le rayonnement atmosphérique de grandes λ (moyen et lointain IR, trait épais). Une fraction variable du rayonnement reçu est absorbée tandis que l'autre est réfléchi. Un corps peut émettre un maximum d'énergie équivalent à celle émise par un corps noir de même température (288.1 K, gris foncé sur la figure ; 303.1 K, gris clair). Si l'énergie émise est supérieure à l'énergie absorbée, alors il y a refroidissement radiatif.

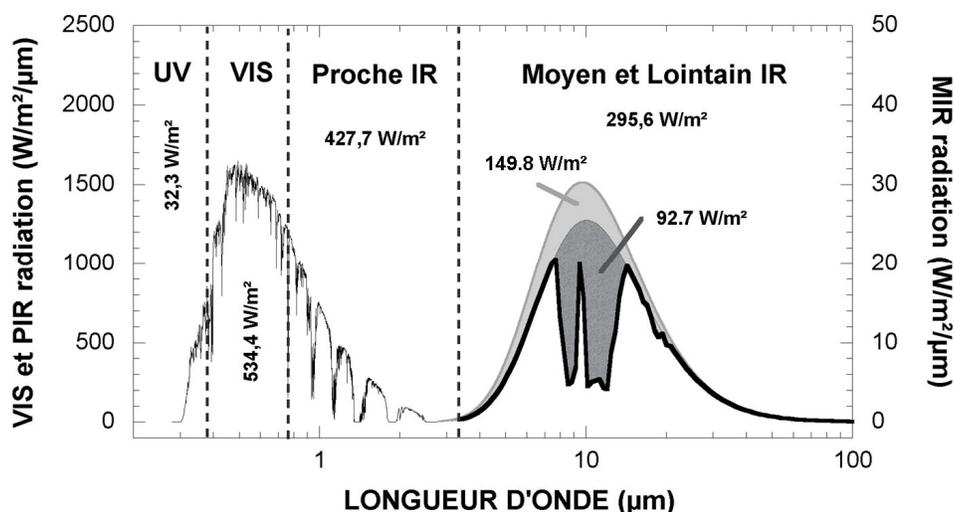


Figure A. 4. Trait fin, rayonnement solaire (ASTM G173-03). Trait gras, spectre Infrarouge reçu à la surface du globe. Surface grise foncée, émittance d'un corps noir (288.1 K). Surface grise claire, émittance d'un corps noir (303.1 K). Les puissances reçues pour chaque composante du spectre sont indiquées en $W m^{-2}$.

L'énergie radiative globale reçue au niveau du sol (de jour,) représente $1290 W m^{-2}$ en atmosphère standard et pour une température de 288.1 K. La première composante est le rayonnement solaire qui se décompose en rayonnements UV, Visible et Proche IR représentant respectivement 2.5 % ; 41.4 % et 33.2 % du rayonnement global. De jour (pour une température ambiante de 15°C), l'émission IR du ciel (Moyen et Lointain IR) représente 22.9 % de l'énergie totale reçue avec $295.6 W m^{-2}$. De nuit, ce même rayonnement représente 100 % de l'énergie reçue.