

Impacts des changements climatiques sur les modèles de conception des liaisons hertziennes

par

Yamina BETTOUCHE

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

MONTREAL, LE MARDI 3 FÉVRIER 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Yamina Bettouche, 2026



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Ammar B. Kouki, directeur de thèse
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Basile L. Agba, codirecteur
Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)

M. Mohamed Cheriet, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. François Gagnon, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Tayeb A. Denidni, examinateur externe indépendant
Institut national de la recherche scientifique (INRS)

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE "15 DÉCEMBRE 2025"

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier vivement mon directeur de mémoire le docteur Ammar B. Kouki, professeur au département de génie électrique de l'école de technologie supérieure (ÉTS) et mon co-directeur le docteur Basile L. Agba, chercheur à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) pour leur soutien et leur compréhension pendant toute la durée de cette thèse. Je remercie également tous les membres du jury pour leur présence à ce grand jour pour moi. Je remercie aussi tous les membres de ma famille qui m'ont toujours apporté leur encouragement et leur aide. Finalement je remercie tous les amis qui m'ont soutenu de près ou de loin pendant toute la durée de ce mémoire.

Impacts des changements climatiques sur les modèles de conception des liaisons hertziennes

Yamina BETTOUCHE

RÉSUMÉ

Les valeurs de la plupart des indices utilisés dans la conception des liaisons hertziennes dépendent de la variation des paramètres météorologiques dans la troposphère. Le but du présent travail est d'analyser les variations de ces indices au Québec. Pour cela il est nécessaire d'étudier en particulier les variations à court-terme et à long-terme du coïndice de réfraction (N), du gradient vertical du coïndice de réfraction (dN1) et du facteur géoclimatique (K). Les méthodologies utilisées dans ce travail comprennent : 1) La méthode proposée par l'Union internationale de la télécommunication pour l'estimation de N, dN1, etc. 2) L'analyse de cluster a été utilisée pour obtenir 5 zones avec différentes valeurs de N. 3) Le lissage direct, une technique de prévision, pour estimer les valeurs futures de N. En se basant sur des données expérimentales de quelques liaisons hertziennes, nous avons constaté qu'il existe une variation saisonnière de K. Cette variation est principalement due à la variation de l'humidité. La valeur de K varie également d'une année à l'autre, indiquant la nécessité de mettre à jour les recommandations de l'UIT qui ne prennent pas actuellement en compte le changement climatique pour estimer la valeur de K. On a appliqué l'analyse de cluster aux données collectées dans 50 stations pour obtenir 5 zones. Les données collectées pendant une année au nord ont été utilisées pour estimer N, dN1 et K. Les valeurs les plus négatives de dN1 sont observées pendant l'été. Ceci est principalement dû aux variations importantes de la température et de l'humidité au cours de cette saison. L'étude de la variation à long-terme de N et dN1 avec les données collectées pendant une période de 35 ans a été réalisée. On observe une augmentation progressive des variations moyennes de N et dN1 pendant la période d'étude, surtout en été. Une telle tendance peut augmenter l'apparition de la super-réfraction. Les données collectées pendant une période de 39 ans dans deux stations dont l'une est située dans le nord du Québec et l'autre dans le sud sont utilisées pour estimer les valeurs de N. Les valeurs de la composante sèche de N sont plus élevées dans le nord, alors que les valeurs de sa composante humide sont plus élevées dans le sud. La pente la plus élevée pour la variation de N est observée dans la partie nord. Nous avons appliqué la technique de prévision par lissage direct sur les données collectées dans le nord pour estimer les valeurs futures de N. La performance de cette technique a été analysée.

Mots-clés: Coïndice de réfraction, court-terme, facteur géoclimatique, gradient, long-terme

Impacts of climate change on microwave link design models

Yamina BETTOUCHE

ABSTRACT

The values of most indices used in the design of radio links depend on the variation of the meteorological parameters in the troposphere. The aim of the present work is to analyze the variations of these indices in Quebec. For this, it is necessary to study, the short-term and long-term variations of the refractivity, N and its vertical gradient, $dN1$, as well as of the geoclimatic factor, K . The methodologies used in this work include : 1) The method proposed by the international Telecommunication Union (ITU) for estimating the values of the indices. 2) The clustering analysis for obtaining 5 areas from North to South with different values of N , and 3) The direct smoothing forecasting technique for forecasting the values of N . Based on the experimental data of several terrestrial links, we found that there is a seasonal variation of K which is mainly due to the variation of the humidity. The value of K also varies from year to year, indicating the need to update ITU recommendations that currently do not consider climate change for estimating the value of K . The clustering analysis has been applied on the meteorological data collected from 50 stations to obtain 5 areas with different variations of N from North to South. The best input data for the identification is the water vapour pressure. The results show that the value of N increase from North to South. Data collected during one year in the North has been used to estimate N , $dN1$ et K . It is observed that the more negative values of $dN1$ lie in the summer season. This is mainly due to the important variations of the temperature and humidity during this season. The study of long-term variation of N and $dN1$ is performed using data collected for a period of 35 years. The variations of N and $dN1$ show a progressive increase over the period of study, especially in summer. Such a trend may increase the occurrence of super-refraction. Data collected during 39 years at one station located in the North of the Quebec and another located in the South is used to estimate the values of N . The values of the dry component of N are higher in the North, whereas that the values of the wet component are higher in the South. The highest slope for the variation of N is observed in the northern part. We apply direct smoothing forecasting technique on the data collected in the North to estimate future values of N . The performance of this technique is analysed.

Keywords: Geoclimatic factor, gradient, long-term, refractivity, short-term

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 MÉTHODES DESTIMATION DU COÏNDICE DE RÉFRACTION 13	
1.1 Influence des paramètres météorologiques sur la performance de liaisons hertziennes	13
1.2 Revue des méthodes utilisées pour l'estimation de N	15
1.2.1 Méthodes basées sur l'utilisation des données radiosondes	15
1.2.2 Méthodes basées sur l'utilisation des données mesurées au sol	21
1.3 Méthodologie utilisée pour l'estimation de N et son gradient	25
1.3.1 Estimation de N, dN1 et K : Notion de la réfraction atmosphérique	26
1.3.2 La courbure du rayon radioélectrique : Notion du rayon terrestre fictif	30
1.3.3 Les effets de la réfraction atmosphérique	30
CHAPITRE 2 ANALYSE DE LA DISPONIBILITÉ DES LIAISONS HERTZIENNES	35
2.1 Évaluation théorique du facteur géoclimatique	35
2.2 Détermination expérimentale du facteur géoclimatique	36
2.3 Détermination des valeurs saisonnières de Kmes	40
2.4 Analyse de la variation saisonnière de Kmes	40
CHAPITRE 3 ÉTUDE DE LA VARIATION À COURT-TERME DE N ET SON GRADIENT	43
3.1 Étude de la variation de N dans les zones identifiées	43
3.1.1 Regroupement des régions en zones	43
3.1.2 Analyse des variations annuelles de N dans les différentes zones	47
3.1.3 Analyse des variations mensuelles de N dans les différentes zones	50
3.2 Analyse de l'effet de la présence d'un cours d'eau sur la variation de N	51
3.3 Analyse des variations de N, dN1 et K dans la région nord-est du Québec	56
3.3.1 Analyse de la variation de N	57
3.3.2 Analyse de la variation de dN1	61
3.3.3 Analyse de la variation de K	65
CHAPITRE 4 ÉTUDE DE LA VARIATION À LONG-TERME DE N ET SON GRADIENT	69
4.1 Étude de la variation de N et son gradient dans le nord du Québec	69
4.1.1 Analyse de la variation de N	70
4.1.2 Analyse de la variation de dN1	78
4.2 Étude comparative de la variation de N dans le nord et le sud du Québec	80

4.2.1	Résultats et analyse de la variation de N	80
4.2.2	Prévision des valeurs de N	86
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		89
ANNEXE I	LES DONNÉES GÉOGRAPHIQUES DES STATIONS UTILISÉES	93
BIBLIOGRAPHIE		95

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 0.1	Comparaison des performances des liaisons CGFO et hertzienne 4
Tableau 1.1	Les types de propagations 31
Tableau 2.1	Les valeurs de K_{mes} et K_{th} 39
Tableau 2.2	Les valeurs de K_{mes} et K_{th} 40
Tableau 2.3	Les valeurs de H et T selon la saison pour les liaisons 1 et 4 41
Tableau 3.1	Les zones identifiées et leurs stations 47
Tableau 3.2	La position géographique des stations 52
Tableau 3.3	Les mois sec et humide de chaque station 53
Tableau 3.4	Exemple des données d'un fichier 56
Tableau 3.5	Comparaison des valeurs annuelles obtenues et celles de UIT 64
Tableau 4.1	La corrélation entre les valeurs mensuelles de N et e et entre N et T 74
Tableau 4.2	Les valeurs de N pour les mois de février et août 75
Tableau 4.3	Les tendances moyennes mensuelles pour T et e 75
Tableau 4.4	Les tendances linéaires saisonnières de N, T et e 77
Tableau 4.5	Corrélation entre les valeurs moyennes mensuelles de N et e et entre N et T 77
Tableau 4.6	Comparaison de N_{sec} et N_{hum} à Montréal et Kuujjuak 82
Tableau 4.7	Corrélation entre les valeurs de N et celles de T, e et P 83
Tableau 4.8	Équations des tendances linéaires pour les mois sélectionnés 86

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1 Réseau de télécommunications d'Hydro-Québec	4
Figure 1.1 Classification des méthodes d'estimation de N	15
Figure 1.2 L'organigramme pour déterminer N(h) et dN1	32
Figure 1.3 Rayons radioélectriques pour certaines valeurs de k	33
Figure 1.4 Rayons radioélectriques selon la valeur de dN1	33
Figure 2.1 Localisation géographique des 4 liaisons surveillées	37
Figure 2.2 La durée de l'événement d'indisponibilité	38
Figure 2.3 Illustration de l'approche utilisée (méthode UIT)	39
Figure 2.4 Valeurs de Kmes pendant les quatre saisons (Liaison 1)	41
Figure 2.5 Valeurs de Kmes pendant les quatre saisons (Liaison 4)	42
Figure 3.1 L'organigramme proposé pour le regroupement des stations en zones	44
Figure 3.2 Variations moyennes annuelles de N par zone	47
Figure 3.3 Variations moyennes annuelles de P par zone	48
Figure 3.4 Variations moyennes annuelles de N ramenées au niveau de la mer	48
Figure 3.5 Valeur moyenne annuelle de e par zone	49
Figure 3.6 Valeur moyenne annuelle de T par zone	49
Figure 3.7 Variations moyennes mensuelles de N dans la zone 1	50
Figure 3.8 Variations moyennes mensuelles de N dans la zone 2	51
Figure 3.9 Variations moyennes mensuelles de N dans la zone 3	52
Figure 3.10 Localisation géographique des quatre stations analysées	52
Figure 3.11 Variations moyennes journalières de N pour les mois sec et humide de la station 1	53

Figure 3.12	Variations moyennes journalières de N pour les mois sec et humide de la station 2	54
Figure 3.13	Variations moyennes journalières de N pour les mois sec et humide de la station 3	54
Figure 3.14	Variations moyennes journalières de N pour les mois sec et humide de la station 4	55
Figure 3.15	Variations moyennes journalières de N, H et T au sol en août 2013	58
Figure 3.16	FDP en été et annuelle de N	59
Figure 3.17	Variation moyenne mensuelle de N	59
Figure 3.18	Variation moyenne saisonnière de N	60
Figure 3.19	FDP moyennes mensuelles de N	60
Figure 3.20	Variations moyennes journalières de dN1	61
Figure 3.21	Variations moyennes mensuelles de dN1, e et t en 2013	62
Figure 3.22	Variations moyennes mensuelles de la distribution cumulative de dN1	63
Figure 3.23	Variations moyennes mensuelles de dN1 pour différents pourcentages de temps	64
Figure 3.24	Distributions cumulatives moyennes saisonnières et annuelles de dN1	64
Figure 3.25	Variations moyennes journalières de K, H et t au sol	66
Figure 3.26	Variations moyennes journalières de K, dN1 et N à h = 65 m	67
Figure 4.1	Variations mensuelles moyennes de N, T et e	70
Figure 4.2	Variations moyennes mensuelles de N et T durant le 1er cycle	71
Figure 4.3	Variations moyennes mensuelles de N et e durant le 2e cycle	71
Figure 4.4	Distributions cumulatives moyennes mensuelles de N	72
Figure 4.5	Variations moyennes mensuelles de N et leurs tendances (de décembre à mai)	73
Figure 4.6	Variations moyennes mensuelles de N et leurs tendances (de juin à novembre)	73

Figure 4.7	Variations moyennes saisonnières de N et leurs tendances linéaires	76
Figure 4.8	Variations moyennes annuelles de N par zone	78
Figure 4.9	Variations moyennes mensuelles de dN1, e et T	79
Figure 4.10	Variations moyennes mensuelles des composantes sèches	81
Figure 4.11	Variations moyennes mensuelles des composantes humides	82
Figure 4.12	Variations moyennes mensuelles de N	83
Figure 4.13	Contribution relative moyenne mensuelle de Nhum dans N	84
Figure 4.14	Variations moyennes annuelles de N et leurs tendances linéaires	85
Figure 4.15	Distributions cumulatives moyennes annuelles de N	85
Figure 4.16	Variations de N et leurs tendances pour les mois sélectionnés	86
Figure 4.17	Valeurs observées et prévisions de N	88

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CC	Changement Climatique
CCR	Centre de Conduite du Réseau
CGFO	Câble de Garde avec Fibres Optiques
CT	Centre de Téléconduite
dM/dh	Module de Réfraction
$dN1$	Gradient Vertical du Coïndice de Réfraction
e	Pression de Vapeur d'eau
k	Facteur Multiplicatif du Rayon Terrestre
K	Facteur Géoclimatique
LH	Liaison Hertzienne
M	Module de Réfraction
N	Coïndice de Réfraction
NPCC	Northeast Power Coordinating Council
P	Pression Atmosphérique
CRCR	Le centre de relève de conduite du réseau
RFP	Le réglage fréquence-puissance
SPS	Special Protection System
T	Température
TC	Téledélestage de Charge
UIT	Union Internationale de la Télécommunication

INTRODUCTION

01 Généralités

De nos jours l'électricité est utilisée dans presque toutes les sphères des activités. Cette tendance s'est accentuée avec l'utilisation de l'informatique dans pratiquement tous les services. Dans ces conditions la fiabilité de la fourniture d'électricité est devenue un enjeu majeur. Cette fiabilité est surtout déterminée par la performance du réseau de transport d'électricité. Ceci est particulièrement vrai pour le réseau de transport d'Hydro-Québec qui comporte plusieurs lignes à très haute tension (735 kV). Ces lignes transportent des grandes quantités d'énergie à partir des centrales électriques situées très loin des centres de consommation. De ce fait un défaut mal géré sur l'une de ces lignes peut engendrer des grosses pertes. Pour assurer la fiabilité du réseau de transport Hydro-Québec, TransÉnergie qui s'occupe de la conception, de la gestion et de l'exploitation de ce réseau préconise un certain nombre de mesures pour optimiser la performance du réseau de transport d'électricité. Parmi ces mesures on peut citer : Une détection/élimination rapide des défauts qui surviennent sur les lignes, une gestion en temps réel du réseau et des automatismes de protection spéciale. Les automatismes de protection spéciale servent à maintenir l'intégralité du réseau même en cas d'apparition d'événements d'une rare violence. Toutes les mesures de protection du réseau de transport d'électricité du Québec sont basées sur l'utilisation des réseaux de télécommunications. Donnons un aperçu de cette utilisation. Le réseau de transport d'électricité du Québec est conçu, exploité et maintenu par Hydro-Québec TransÉnergie. Ce réseau comporte un total de 34 272 km de lignes, dont 11 719 km sont des lignes avec une tension de 765 kV et 735 kV. De ce fait il est le plus vaste réseau d'Amérique du Nord (Hydro-Québec, 2022). Pour assurer un fonctionnement fiable de son réseau de transport Hydro-Québec, TransÉnergie utilise deux principales approches :

1) les défauts qui surviennent sur les lignes du réseau de transport à très haute tension sont éliminés d'une façon sélective et rapidement. Cela est possible grâce à l'utilisation d'un réseau de télécommunications afin de recevoir les données qui déterminent l'état du réseau électrique

et de transmettre les commandes appropriées.

2) la gestion en temps réel du réseau qui est réalisé par un centre de conduite (CCR), un centre de relève (RCCR) et sept centres de téléconduite (CT).

Détaillons les fonctions principales de CCR, RCCR et CT.

Le CCR, situé à Montréal assure les principales fonctions suivantes (Beaulieu & Raymond, 2006) : - maintenir les valeurs des transits, des tensions, des réserves d'exploitation, et de la fréquence dans les limites qui assurent la sécurité et la fiabilité du réseau.

- ajuster les programmes de production et d'échanges en temps réel.
- autoriser les interventions avec les réseaux voisins.
- autoriser les retraits d'équipements de juridiction provinciale.
- coordonner la remise en charge du réseau.
- coordonner les activités avec les centres de conduite des réseaux hors Québec.

Le CCR est secondé par un centre de relève (RCCR) qui se trouve également sur l'île de Montréal. Les CCR et RCCR utilisent aussi des liaisons des télécommunications pour accomplir leurs tâches. Par exemple via ces liaisons des télécommunications le CCR :

- reçoit en temps réel des informations en provenance des principales installations, des réseaux électriques voisins et des centres météorologiques.
- émet des consignes pour le fonctionnement du système de réglage fréquence-puissance (RFP) vers les centres de téléconduite correspondants.
- réalise le télédélestage de charge (TC) (TransÉnergie, 2002a).

Les sept CT situés dans sept villes différentes du Québec dont Montréal, Québec et Trois-Rivières remplissent les fonctions suivantes :

- télécommander les postes et les centrales en tenant compte des consignes du CCR.
- effectuer les manœuvres requises pour ajuster les équipements de production et de transport.
- gérer les retraits d'équipements pour fins de maintenance et leur remise en service.

- prendre (temporairement) la relève du CCR et du RCCR lors d'événements majeurs, en utilisant les données centralisées sur des serveurs situés à Montréal (TransÉnergie, 2002b).

Pour réaliser ces fonctions les CT utilisent la télécommande et la télémessure des postes et des centrales.

Pour éviter l'écroulement du réseau électrique lorsqu'un grand défaut apparaît on active un automate appelé 'Special Protection System' (SPS) dont le rôle consiste d'abord à maintenir l'intégralité du réseau et ensuite éviter la destruction des équipements (TransÉnergie, 2002b). L'automatisme SPS doit utiliser nécessairement un réseau des télécommunications car son fonctionnement est basé sur le principe suivant : Le défaut est détecté à un endroit donné et l'action appropriée est prise à un autre endroit. La détection et la réalisation de l'action doivent bien sûr être accomplies rapidement (TransÉnergie, 2001). Notons que pour la plupart des automatismes et des protections de lignes du réseau électrique pour obtenir la fiabilité, la redondance et l'indépendance des télécommunications sont nécessaires. Par exemple pour certaines lignes lorsque les deux liaisons de télécommunications ne sont pas disponibles, ces dernières doivent être mises hors service. D'autre part, en absence de télécommunications la sélectivité en cas de défaut n'est plus garantie, ce qui peut entraîner le déclenchement des certaines lignes qui ne devraient pas déclenchées en principe car le défaut n'est pas dans leur zone (TransÉnergie, 2002a). En cas d'indisponibilité prolongée de l'une des deux liaisons de télécommunications des limites d'exploitation du réseau doivent être imposées selon les recommandations de NPCC (Northeast Power Coordinating Council) (NPCC, 2004). Pour des raisons énumérées ci-dessus Hydro-Québec utilise un réseau de télécommunication composé de CGFO (câble de garde avec fibres optiques) et de liaisons hertziennes. La figure I montre la configuration du réseau de télécommunications (en janvier 2005) (Beaulieu & Raymond, 2006) :

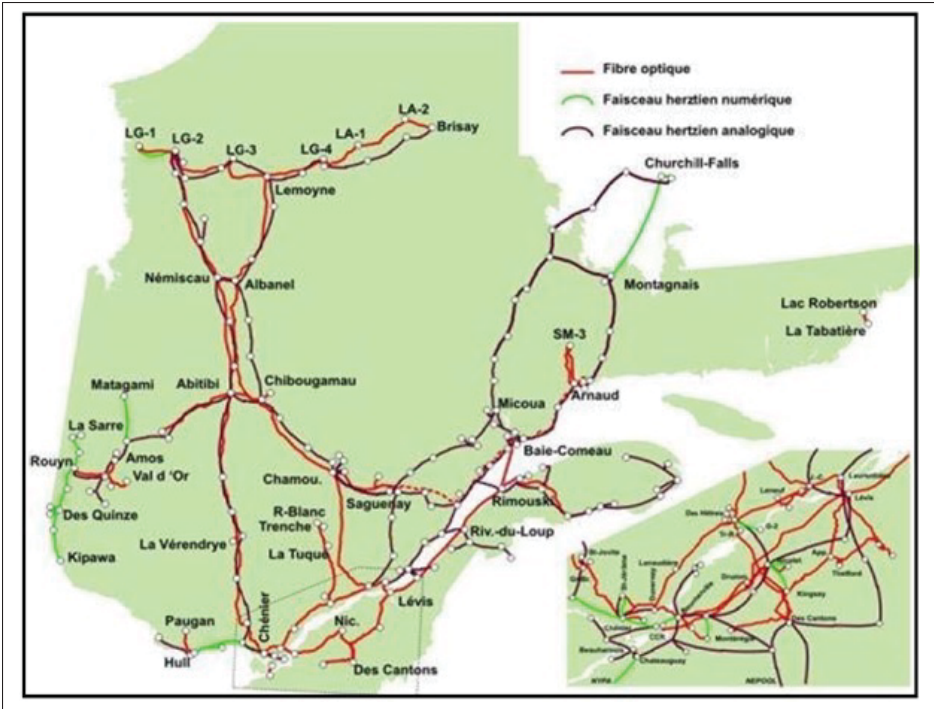


FIGURE 0.1 Réseau de télécommunications d’Hydro-Québec

Comparons à présent les liaisons CGFO et hertzienne Le tableau 0.1 donne une comparaison sommaire des performances de ces moyens de télécommunications. Une description plus complète de ces avantages et des inconvénients se trouvent dans (Beaulieu & Raymond, 2006).

TABLEAU 0.1 Comparaison des performances des liaisons CGFO et hertzienne

Performance	Liaison CGFO	Liaison Hertzienne
Immunité aux interférences	Plus grande	-
Robustesse aux aléas climatiques	-	Plus robuste
Délai de transmission	-	Plus court
Temps moyen de réparation	-	Plus court
Capacité de transfert de données	Plus grande	-
Coût pour une même distance	-	Moins chère

Immunité : La liaison CGFO a une grande immunité contre les interférences électromagnétiques et atmosphériques. Ce qui n’est pas le cas d’une liaison hertzienne. En effet, la variation des

paramètres météorologiques engendre l'évanouissement du signal d'une liaison hertzienne.

Robustesse aux aléas climatiques : L'analyse des impacts du grand verglas de 1998 au Québec a montré que la liaison hertzienne est plus fiable par rapport à la liaison CGFO. En effet, pendant le verglas la liaison hertzienne était restée fonctionnelle, tandis que la liaison CGFO qui utilise les mêmes pylônes que le réseau électrique s'est écroulée avec ce dernier.

Délai de transmission : Le délai de transmission des données est plus court dans une liaison hertzienne. Ce qui peut présenter un avantage certain pour une protection spéciale dans laquelle la détection d'un événement se fait dans un endroit et l'action correspondante dans un autre.

Temps moyen de réparation : Étant donné que la liaison hertzienne utilise nettement moins des pylônes il est plus rapide de réparer la liaison en cas de chute de pylônes. Si par exemple, suite à un événement exceptionnel la réparation de la chute d'un pylône de la liaison hertzienne prend quelques jours, alors la réparation d'une liaison CGFO prendra quelques semaines. Donc, la liaison hertzienne a une plus grande disponibilité par rapport à la liaison CGFO.

Capacité : Notons que généralement une liaison CGFO comporte 24 à 48 fibres optiques. Une fibre optique peut transporter au moins 16 longueurs d'onde optique dont chacune peut transmettre jusqu'à 32000 circuits de 64 kb/s. Ce qui fait de la liaison CGFO un moyen de télécommunications à très grande capacité de transfert de données qui dépasse largement le niveau exigé par le réseau électrique.

Coût : Pour une même distance la liaison CGFO est plus chère qu'une LH. Pour cette raison dans les zones étendues avec une densité faible de la population Hydro-Québec utilise uniquement les LH comme moyen de télécommunications. Notons que plus de 30% de liaisons micro-ondes au Québec ont des longueurs de 50 à 90 Km (beaucoup plus que la longueur moyenne des liaisons micro-ondes au Canada).

En résumé :

- la fiabilité du réseau d'électricité du Québec est tributaire du réseau de télécommunications utilisé. Pour assurer un service fiable de fourniture d'électricité, le réseau de télécommunications

d'Hydro-Québec est composé de deux liaisons indépendantes : Des liaisons par fibre optique et des liaisons hertziennes.

- les liaisons hertziennes sont généralement utilisées en cas de panne des liaisons par fibre optique, ou pendant des événements catastrophiques (grand verglas) ou encore dans les grandes zones du Québec faiblement peuplées.
 - la disponibilité des liaisons hertziennes dépend des variations des paramètres météorologiques.
- Le chapitre 2 de ce document donne une revue de la littérature concernant l'influence de variations des paramètres météorologiques sur la performance des liaisons hertziennes.

02 Motivation

Les indices qui sont utilisés dans la conception des liaisons hertziennes dépendent généralement de l'humidité relative, de la température et de la pression. Étant donné la variation de ces paramètres et dans le contexte du changement climatique (CC), l'estimation et l'analyse de ces indices sont très importantes. En effet, les liaisons sont utilisées dans le réseau de télécommunications d'Hydro-Québec pour :

- 1) des raisons stratégiques ;
- 2) la gestion des équipements ;
- 3) la gestion des applications critiques.

Détaillons à présent l'importance des besoins énumérés ci-dessus.

1) Les raisons stratégiques. Pour assurer un service continu de fourniture d'électricité à ses clients dans les conditions normales, comme dans les conditions catastrophiques, Hydro-Québec a adopté les stratégies suivantes :

a) redondance. Dans les zones fortement peuplées du Québec la fibre optique est le principal réseau de télécommunication d'Hydro-Québec. Après la tempête de verglas, l'équipe de télécommunications d'Hydro-Québec TransÉnergie a constaté et recommandé le maintien des LH parallèlement avec les liaisons par fibre optique pour assurer le service en cas de panne de la fibre optique. En effet, les LH ont montré une plus grande fiabilité pendant la période du grand

verglas.

b) extension en zones isolées. Le Québec a une grande superficie. Mais 80% de la population est concentrée sur une superficie relativement petite autour du fleuve Saint-Laurent et 20% de la population se trouve sur la plus grande partie de la superficie. Dans cette partie où la densité de la population est faible, étant donné les longues distances que le réseau de télécommunications doit couvrir il est préférable pour des raisons économiques de privilégier les LH.

2) La gestion des équipements.

Le bris d'un équipement important peut entraîner des pertes énormes. Pour minimiser ces pertes, il est nécessaire à l'aide d'un réseau de télécommunication de réaliser les fonctions suivantes :

a) mesurer certains paramètres des équipements pour l'optimisation de la performance des équipements du réseau électrique. Par exemple maximiser la puissance des alternateurs et des transformateurs sans compromettre leur durée de vie.

b) surveiller l'état d'un équipement afin :

i. de contrôler les conditions normales de son fonctionnement. Par exemple la température maximale des transformateurs dont le système d'isolation est composé de papier imprégné et immergé dans l'huile est de 55°C. Cette température varie de 45°C à 135°C lorsque d'autres types de matériaux isolants sont utilisés.

ii. de comprendre le mécanisme de son vieillissement.

iii. d'estimer sa durée de vie.

c) contrôler l'équipement à distance.

3) La gestion des applications critiques. Des applications critiques qui sont tributaires du réseau de télécommunications sont nécessaires pour la production, le transport et la distribution de l'électricité.

a) La production. Une gestion optimale de la production en temps réel afin de maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande est nécessaire.

b) Le transport. Des centres de conduite du réseau (CCR) sont utilisés pour gérer le réseau de

transport et des centres de conduite sont prévus pour télécommander les postes et les centrales en tenant compte des consignes de CCR.

c) La distribution. La gestion optimale de la puissance réactive est très importante pour maintenir les valeurs des différentes tensions dans les limites acceptables et minimiser des pertes.

d) Un échange des données en temps réel entre les unités de production, de transport et de distribution est nécessaire pour coordonner la gestion de l'ensemble du réseau.

03 Objectifs

Les objectifs visés dans ce travail peuvent être résumés en quelques points :

1. analyser la disponibilité des certaines LH d'HQ à l'aide du facteur géoclimatique.
2. proposer un algorithme d'identification des différentes zones du Québec selon la variation du coïndice de réfraction.
3. réaliser une analyse des variations du coïndice de réfraction et son gradient à court terme dans la région nord du Québec.
4. réaliser une analyse à long terme des valeurs estimées du coïndice de réfraction et son gradient afin de tenir compte des changements climatiques dans la région nord du Québec.
5. réaliser une étude comparative à long terme des valeurs estimées du coïndice de réfraction et son gradient dans des régions nord et sud du Québec.
6. réaliser une étude comparative à court terme des valeurs estimées du gradient du coïndice de toutes les régions du Québec. Analyser les résultats obtenus et les comparer avec les valeurs correspondantes fournies par l'UIT.

04 Contributions de la thèse

1. Une méthode de la détermination expérimentale du facteur géoclimatique (K) a été proposée. La méthode proposée a été utilisée pour analyser la variation du facteur géoclimatique en se basant sur les données recueillies sur certaines liaisons hertziennes du Québec.
2. Pour l'analyse à court terme (une durée d'un an) des variations du coïndice de réfraction (N) et

son gradient ($dN1$), un découpage du territoire du Québec en zones a été proposé. Ce découpage consiste à une partition des 50 stations qui sont situées dans différentes régions climatiques du Québec en un nombre désiré de zones du nord au sud à l'aide d'un algorithme hiérarchique d'agglomération. Le meilleur critère de partition a été identifié. Dans chaque zone une analyse détaillée des variations moyennes de N et son gradient ($dN1$) est donnée.

3. Les données recueillies dans certaines stations ont été utilisées pour analyser l'influence de présence d'un cours d'eau sur la variation de N .
4. Une étude à court terme de la variation de N , $dN1$ et K dans le nord-est du Québec. Les données utilisées dans l'étude sont celles de l'année 2013 de la station Kuujjuaq.
5. Une étude à long terme de la variation de N et son gradient $dN1$ dans le nord du Québec. Les données utilisées dans cette étude sont d'une période de 35 ans de la station de Kuujjuaq.
6. Une étude comparative à long terme de la variation de N dans le nord et le sud du Québec. Pour cette étude des données météorologiques mesurées et archivées pendant 39 années dans une station située dans la partie nord du Québec, Canada et une autre station située dans la partie sud ont été utilisées pour estimer N ainsi que ses composantes sèche (N_{sec}) et humide (N_{hum}). Les principales contributions de la thèse ont été publiées dans 4 articles de journal et 2 articles de conférence.

Articles de journal :

1. Yamina Bettouche, Basile Agba, Ammar Kouki, Huthaifa Obeidat, Haru Alhassan Ali Alabdullah, Jonathan Rodriguez, and Raed Abd-Alhameed, 'Determination of Areas for Surface Refractivity Variation Analysis Over Quebec', Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 208, 15 October 2020, pages : 1-7.
2. Yamina Bettouche, Basile Agba, Ammar Kouki, Huthaifa Obeidat, Ali Alabdullah, Fathi Abdussalam, Sabir Ghauri, and Raed Abd-Alhameed, 'Estimation and Analysis of the Radio Refractivity, its Gradient and the Geoclimatic Factor in Arctic Regions', Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 92, 181-192, 2020.

3. Bettouche, Y., Obeidat, H., Agba, B., Kouki, A., Alhassan, H., Rodriguez, J., Jones, S. (2019). Long-Term Evolution of The Surface Refractivity for Arctic Regions. *Radio Science*, 54(7), 602-611.

4. Y. Bettouche, H. A. Obeidat, B.L. Agba, A. B. Kouki, M. F. Mosleh, A. M. AlAbdullah, and R. A. Abd-Alhameed, 'Comparison of Surface Radio Refractivity Variability in the Northern and Southern Parts of Quebec, Canada', *Radio Science*, Volume 55, Issue7, July 2020, pages 1-8.

Articles de conférence :

1. Y. Bettouche, A.B. Kouki, Basile L. Agba et O. Ben Sik Ali, "Seasonal Variation of Geoclimatic Factor in Terrestrial Wireless Link Design", 2012 International Symposium on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE), 3-5 Oct. 2012, IEEE Xplore.

2. B. L. Agba, O. Ben Sik Ali et Y. Bettouche, "Impact des changements climatiques sur l'ingénierie des communications sans fil – Cas des liaisons hertziennes", EIC Climate Change Technology Conference 2013.

05 Organisation de la thèse

Le reste de cette thèse comporte quatre chapitres, une conclusion et recommandations, une annexe ainsi qu'une bibliographie.

Le premier chapitre présente dans un premier temps l'influence de certains paramètres météorologiques sur la qualité de la propagation des ondes radioélectriques dans la troposphère. Ensuite on donne une revue de la littérature concernant les méthodes utilisées pour l'estimation du coïndice de réfraction (N).

Le chapitre deux traite de la variabilité du facteur géoclimatique sur une période d'un an 2009-2010 pour quatre liaisons hertziennes terrestres au Québec. Ce chapitre comporte cinq sections. Les sections 1 et 2 décrivent la méthodologie utilisée pour déterminer la valeur théorique et expérimentale du facteur géoclimatique respectivement. Dans la section trois on détermine les valeurs saisonnières du facteur géoclimatique mesuré K_{mes} . La section quatre donne une analyse détaillée de la variation saisonnière de K_{mes} . La section 2.5 présente les

conclusions.

Le chapitre trois est consacré à l'étude de la variation à court-terme de N et son gradient. Il comporte trois sections. La section 3.1 est dédiée à l'étude de la variation de N dans les différentes régions du Québec qui ont été regroupées en 5 zones. La section deux décrit l'influence d'un cours d'eau sur la variation de N en se basant sur les données des quatre stations. La dernière section donne une analyse détaillée des variations de N et de son gradient dans la région nord-est du Québec.

Le dernier chapitre est dédié à l'étude de la variation à long-terme de N et son gradient. Ce chapitre comporte 2 sections. La première section traite de l'étude de la variation de N et de son gradient dans le nord du Québec. Dans la deuxième section on donne une étude comparative de la variation de N dans le nord et le sud du Québec.

CHAPITRE 1

MÉTHODES D'ESTIMATION DU COÏNDICE DE RÉFRACTION

Dans ce chapitre dans un premier temps on décrit l'influence de certains paramètres météorologiques sur la qualité de la propagation des ondes radioélectriques dans la troposphère. Ce qui nous permettra d'identifier les paramètres qui sont utilisés dans l'estimation du coïndice de réfraction (N). Comme on le verra dans la sous-section 1.3.1 de ce chapitre, N est généralement utilisé à la place de l'indice de réfraction de l'atmosphère, n. Ensuite on donne une revue de la littérature concernant les méthodes utilisées pour l'estimation de N. Cette revue nous permettra de choisir les méthodes à utiliser dans cette thèse en tenant compte des données météorologiques dont nous disposons.

1.1 Influence des paramètres météorologiques sur la performance de liaisons hertziennes

Les liaisons hertziennes terrestres sont largement utilisées pour transmettre des données de l'émetteur vers le récepteur (Grabner, Kvicera, Pechac & Mudroch, 2010; Bogucki & Wielowieyska, 2009). La performance de la transmission dépend non seulement de la performance de l'équipement utilisé, mais aussi de l'état du milieu de la propagation des ondes radioélectriques (troposphère dans ce cas). La troposphère est la région inférieure de l'atmosphère qui est immédiatement au-dessus de la surface de la terre. Elle s'étend jusqu'à une altitude de l'ordre de 8-10 km aux pôles de la terre et de 18-19 km à l'équateur (Adediji, A., Ajewole, M., Falodun, S. & Oladosu, O., 2007; Grabner, Kvicera, Pechac & Jicha, 2012). En général, dans la troposphère les valeurs de la température, de la pression et la pression de la vapeur d'eau (l'humidité relative) diminuent lorsque l'altitude augmente. Cependant en présence de certains phénomènes climatiques on peut observer une augmentation de ces paramètres avec l'augmentation d'altitude. On parlera alors d'inversion de la pression, de la température ou de l'humidité. Dans la suite de ce document par souci de simplicité on utilisera le terme 'paramètres météorologiques' pour désigner les trois paramètres : la pression, la température et l'humidité relative de l'air. La variation des paramètres météorologiques a un impact important sur la

qualité de la propagation des ondes radioélectriques (Priestley, J. & Hill, R., 1985; Kablak, N., 2007). Cette variation peut conduire à une propagation par trajets multiples. La propagation par trajets multiples est un mécanisme de propagation anormal qui provoque l'atténuation ou la distorsion du signal transmis.

La présence de couches à haute réfraction (le degré de réfraction dans la troposphère est déterminé par l'indice de réfraction radioélectrique, n) dans la troposphère entraîne quelques mécanismes d'évanouissement tels que, les trajets multiples en surface et les trajets multiples atmosphériques. L'un des plus sévères de ces mécanismes est l'évanouissement par trajets multiples (ITU-R, 2015; Norland, 2006; Boumis, Rezacova & Soko, 1999). Pour prendre en compte les retards du trajet et le pourcentage de temps pendant lequel une certaine profondeur d'évanouissement n'est pas dépassée on utilise le coindice de réfraction (N) et son gradient (dN/dh). Le facteur géoclimatique qui est un indicateur de la profondeur d'évanouissement est aussi fréquemment utilisé pendant la conception des liaisons. Dans (Norland, 2006) les auteurs ont étudié la variation de l'indice de réfraction sur un trajet d'environ 3 km en visibilité directe (aucun obstacle entre l'émetteur et le récepteur) pendant une courte période dans une zone côtière montagneuse. Selon cette étude la propagation anormale est due aux variations de l'humidité, de la température et de la pression atmosphérique qui affectent la valeur du gradient de réfractivité.

Donc, la performance des liaisons de communication est déterminée par la qualité de la propagation des ondes radioélectriques dans la troposphère (Grabner & Kvicera, 2003a). Si la qualité de la propagation est mauvaise, deux phénomènes se produisent : l'atténuation du niveau de puissance transmise et la distorsion du signal transmis (Ali, Malik, S., Alimgeer, K., Khan, S. & Ali, R., 2012; ITU-R, 2012; Leclert, 1984; Sizun, 2005).

Pour prendre en compte l'état de l'atmosphère lors de la conception des liaisons hertziennes, on détermine la distribution cumulative du gradient du coindice à une hauteur donnée, h (ITU, 1996a).

1.2 Revue des méthodes utilisées pour l'estimation de N

L'étude des différentes méthodes proposées dans la littérature pour l'estimation de N nous a permis d'obtenir la classification montrée à la figure 1.1. Comme le montre la figure 1.1 la classification est basée sur l'utilisation de deux critères :

1) la nature des données météorologiques disponibles. Selon ce critère on distingue les méthodes basées sur les données radiosondes (données mesurées à une certaine altitude) et celles basées sur les données mesurées au sol.

2) l'étendue des données météorologiques disponibles. Selon ce critère on distingue les méthodes à court terme et à long terme. Dans la littérature je n'ai pas trouvé une définition concernant la durée du court terme et long terme. Pour cette raison dans cette étude je supposerai une durée de 10 ans comme court terme et une durée supérieure à 10 ans comme long terme.

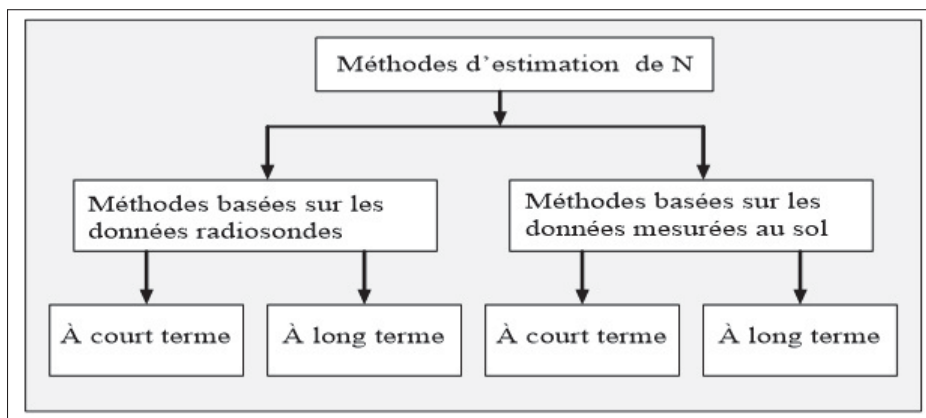


FIGURE 1.1 Classification des méthodes d'estimation de N

1.2.1 Méthodes basées sur l'utilisation des données radiosondes

Dans (Adediji,A., Ismail & Mandeep,J., 2013) les auteurs pour calculer dN1 ont utilisé les valeurs enregistrées pendant trois ans de la pression, de la température et de l'humidité relative. Ces paramètres étaient mesurés à cinq altitudes différentes de 0 à 200m avec un pas de 50 m à la station Akure située dans un climat tropical au Nigeria. Les calculs ont montré que les valeurs du gradient de réfractivité étaient élevées pendant la période de pluie et diminuent à mesure que

l'altitude augmente. Dans cette région où la station Akure est située, le phénomène anormal prédominant de la propagation des ondes radioélectriques est la super-réfraction.

Dans (Ghazali, Hamza, Latiff, Liza, Eltayeb, M. & Gasim, Waleed, 2017) les auteurs ont calculé le gradient du coïndice dans les cinq zones principales du Soudan à l'aide des données des paramètres météorologiques de l'Autorité météorologique soudanaise. Les résultats ont montré que le gradient du coïndice varie légèrement tout au long de l'année. Il a sa valeur la plus faible pendant le mois de mars et sa valeur la plus élevée en août au cours des dix dernières années. Chaque paramètre météorologique joue un rôle dans la qualité de la propagation, mais l'humidité est le facteur qui a le plus d'influence par rapport aux autres paramètres. Cette étude a été utilisée pour améliorer la planification des futures liaisons terrestres au Soudan et prédire l'indisponibilité de la communication par micro-ondes dans ce pays.

Dans (Saeed, Asad & Naveed, 2015) les auteurs ont calculé les valeurs du gradient de réfractivité à une altitude de 100 m sur la base de données météorologiques radiosondes locales fournies par 'British Atmospheric Data Center' de l'année 2010 pour Karachi au Pakistan. Les statistiques annuelles sont analysées et comparées avec des résultats des études précédentes. Des différences considérables entre les résultats de cette étude et des études précédentes ont été observées. Les résultats de cette étude sont comparés avec les résultats de l'UIT et de 'World Atlas of Atmospheric Radio Refractivity'. Une différence significative a été observée. Cette différence peut être attribuée à un certain nombre de facteurs. D'abord les travaux antérieurs étaient basés sur des données, datant de plus de 60 ans. Donc, les impacts des changements climatiques n'étaient pas pris en considération. Deuxièmement, dans les études précédentes, au lieu de considérer les données de l'ensemble de l'année, seules les données d'un mois représentatif de chaque saison étaient utilisées. Troisièmement, les valeurs obtenues à partir des cartes mondiales dans les études précédentes ne sont que des estimations.

Dans (Falodun, S. & Ajewole, M., 2006) pour la planification et la conception des liaisons de communication par micro-ondes les auteurs ont calculé le coïndice et son gradient à une altitude 100 m en se basant sur les mesures locales des paramètres météorologiques effectuées de

novembre 2001 à juillet 2004. Les principaux résultats de cette étude sont :

- 1) les valeurs du coïndice de réfraction à 100m d'altitude sont généralement plus élevées pendant la saison des pluies (mars-octobre) et faibles pendant la saison sèche qui débute à partir de mois de novembre dans la région où est située la station 'Akure' au Nigeria.
- 2) les valeurs maximales du coïndice de réfraction sont observées le matin et la nuit, et les valeurs minimales entre 15 h :00 et 18 h :00 pendant les mois secs et entre 17 h : 00 et 19 h :00 au cours des mois pluvieux.
- 3) les valeurs les plus négatives du gradient du coïndice observées pendant la saison des pluies sont causées par la température qui est plus élevée à cette période de l'année.
- 4) la saison des pluies est également caractérisée par une plus grande variabilité du gradient de l'indice de réfraction.

Dans (Grabner & Kvicera, 2003b) les mesures de la pression, de la température et de l'humidité relative à trois altitudes différentes avec une période d'échantillonnage de 15 secondes ont été réalisées en République Tchèque de septembre 2001 à août 2002. En se basant sur ces mesures les distributions cumulatives mensuelles et annuelles du coïndice et son gradient ont été déterminées. Les résultats de cette étude montrent que :

- 1) les valeurs extrêmes du gradient apparaissent.
- 2) la médiane du gradient est proche de la valeur fournie par les recommandations de l'UIT.
- 3) les valeurs du gradient obtenues à partir des distributions cumulatives diffèrent de plus en plus des valeurs correspondantes fournies par les recommandations de l'UIT lorsque les valeurs du gradient deviennent de plus en plus négatives.
- 4) l'humidité relative a plus d'impact sur la variation du coïndice.
- 5) la pression a un impact négligeable sur la valeur du coïndice.
- 6) la valeur du coïndice est plus sensible à la variation de la température, mais au cours d'une même journée la variation de l'humidité peut être de 50%, ce qui est beaucoup plus important que la variation de la température.
- 7) la variation saisonnière du coïndice semble être due uniquement à la variation de la température.

Dans (Grabner *et al.*, 2012) les auteurs utilisent les valeurs de la température et de l'humidité relative de l'air mesurées à 19 altitudes différentes de 0 à 150 m avec un pas moyen inférieur à 8 mètres et une période d'échantillonnage d'une minute pour déterminer le coïndice et son gradient en utilisant les relations recommandées par UIT. Les valeurs de ces paramètres ont été mesurées à l'aide des capteurs de type 'Vaisala HUMICAP' qui sont situés sur la tour d'un ancien émetteur radio dans la ville de Podebrady. Cette ville de la république Tchèque se trouve à 50 km à l'est de Prague.

Dans (Adediji, A. & Ajewole, M., 2008) les auteurs ont analysé l'influence de variations des paramètres météorologiques sur la qualité de la propagation des ondes radioélectriques dans la ville d'Akure (qui a climat tropical) de l'état Ondo au Nigéria. Les valeurs de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité relative ont été mesurées avec une période d'échantillonnage de 30 minutes au niveau des altitudes suivantes : 0, 50, 100, 150 et 200 m de janvier à décembre 2007. Les travaux de ces auteurs ont permis de dégager les remarques suivantes :

- 1) le coïndice a des faibles valeurs en janvier-février à cause de la prédominance de l'harmatan (vent chaud et sec).
- 2) on observe une légère diminution de la valeur du coïndice en mars-avril à cause de hautes températures associées au début de la saison pluvieuse.
- 3) le coïndice a des valeurs élevées pendant la saison pluvieuse (Avril - Octobre). Cela est dû à la présence d'une haute humidité (près de 100%) pendant cette saison.
- 4) le gradient du coïndice a sa valeur maximale vers février qui correspond à la fin de la saison de l'harmatan. Cette période est caractérisée par des matinées et de nuits très froides et des jours très secs.
- 5) on observe une diminution graduelle du gradient du coïndice en avril-juin et une forte diminution en juillet-octobre (saison pluvieuse).
- 6) pendant la saison de l'harmatan il a été observé durant certains jours une augmentation de la température avec l'augmentation de l'altitude.
- 7) la valeur du coïndice diminue lorsque l'altitude augmente.

8) les conditions anormales de propagation ont des probabilités différentes d'apparition. La sub-réfraction est dominante à toutes les altitudes de janvier à mai. La super-réfraction est dominante aux altitudes de 150m et 200m de juin à décembre. Les conduits sont plus observés aux altitudes de 50m, 100m et 150m pendant la période août-décembre. Dans (Asiyo,M. & Afullo,T., 2013) les auteurs utilisent le facteur géoclimatique et les recommandations P530-14 de l'UIT pour obtenir l'occurrence d'évanouissement par trajets multiples dans les villes d'Afrique du Sud. Les données radiosondes de trois ans sont utilisées dans l'estimation du gradient du coïndice et du facteur géoclimatique. Dans cette étude, l'évanouissement par trajets multiples a été examiné en relation aux conditions climatiques qui prévalent dans les régions d'Afrique du Sud. La distribution cumulative du gradient de réfractivité à une altitude de 65m a été déterminée à partir de laquelle le gradient a été estimé. Le gradient estimé pour les régions était plus négatif que la valeur recommandée par l'UIT pour l'Afrique du Sud. Les pires valeurs mensuelles du gradient dans les villes de Durban, Pretoria et Polokwane ont été observées pendant le mois de février. Les valeurs mensuelles du gradient les plus défavorables sont en Cape Town et en Bloemfontein en mai. Le facteur géoclimatique pour les différentes régions a ensuite été estimé à partir des différentes valeurs du gradient du coïndice. Les résultats obtenus indiquent également que le pire mois peut varier d'une année à une autre, mais il se situe généralement en été dans la plupart des régions de l'Afrique du Sud. Dans (AbouAlmal *et al.*, 2013a) les mesures des valeurs des paramètres météorologiques obtenues à trois différentes altitudes : 65 m, 100 m et 1 km (Ces trois altitudes sont les altitudes de référence pour lesquelles les gradients du coïndice ont été évalués par les recommandations P.453-10 et P.452- 12 de UIT)) pendant la période de 1990 à 2005 aux Émirats Arabes Unis. Ces mesures ont été utilisées pour déterminer les distributions cumulatives correspondantes des gradients de réfractivité. Les résultats obtenus ont montré que :

- 1) des valeurs de plus en plus négatives sont obtenues lorsque l'altitude passe de 1km à 65m. Étant donné que la plupart des liaisons de communications sans fil opère à une altitude entre 65 m et 100 m, il existe une probabilité d'indisponibilité de ces liaisons.
- 2) pour une altitude donnée, le pourcentage de temps pour lequel une certaine valeur du gradient du coïndice soit dépassée est plus grande pendant les matinées.
- 3) les valeurs recommandées par l'UIT ne concordaient pas avec certains des résultats obtenus.

Cela pourrait être attribué au fait que les cartes de l'UIT (ITU-R, 2012) ont été interpolées à partir des données enregistrées par seulement 99 sites dans le monde entre 1955 et 1959. Des différences ont également été observées dans d'autres pays du monde (ITU, 1994). En outre, les courbes et les cartes de l'UIT sont généralement dérivées de mesures effectuées en grande partie dans des régions tempérées, régions du monde telles que l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon (Adediji, A., Ajewole, M. & Falodun, S., 2011) qui ont des conditions climatiques très différentes de la région du Golfe.

4) dans le futur, il est fortement recommandé d'utiliser les résultats obtenus dans cet article dans la conception de systèmes de communication sans fil fonctionnant dans cette région. Dans (Kifah, Al & Rami, A., 2008) les valeurs enregistrées des paramètres météorologiques pendant 14 ans ont été utilisées pour étudier la corrélation entre le coïndice au sol et son gradient dans la ville d'Abu Dhabi où le climat est chaud et humide. Selon les résultats de cette analyse il existe une corrélation exponentiellement décroissante en été entre le coïndice au sol et son gradient. L'analyse montre que la distribution statistique du coïndice au sol est gaussienne, tandis que la distribution est log-normale pour le gradient de réfractivité à une hauteur de 1 kilomètre par rapport au sol. La distribution mensuelle moyenne la plus défavorable pour le coïndice se situe en décembre pour les faibles pourcentages de temps et en août pour les pourcentages de temps plus élevés. La pire distribution mensuelle moyenne pour le gradient du coïndice se trouve en juillet pour les valeurs faibles et intermédiaires du pourcentage de temps et en janvier pour les pourcentages de temps plus élevés. Dans (Zilinskas, Tamosiunaite, Tamosiuniene, Valma & Tamosiunas, 2012) la variation du coïndice de réfraction en fonction d'une certaine hauteur par rapport au sol a été examinée. La méthode proposée par les recommandations de UIT a été utilisée pour déterminer le gradient du coïndice dans la ville de Kaunas en Lituanie. Cette ville a été choisie en tenant compte de études antérieures des auteurs qui ont montré que la variation annuelle moyenne du coïndice était plus élevée dans cette ville en comparaison avec d'autres localités de la Lituanie. Les données météorologiques locales, qui ont été mesurées près du sol et également à différentes hauteurs ont été utilisées pour le calcul du coïndice. Il a été conclu que les conditions anormales de la propagation des ondes radioélectriques telles que la super-réfraction et les conduits pourraient se produire à la fin du mois d'avril à Kaunas.

L'inversion de la température, c'est-à-dire l'augmentation de cette dernière avec l'augmentation de l'altitude a été observée à la fin avril des années 2009, 2010 et 2011. Dans (AbouAlmal, Abd-Alhameed,R., Jones,S. & AlAhmad, 2014a) les auteurs ont utilisé les valeurs mesurées au sol et à une altitude de 100 m de l'humidité relative de l'air, de la température et de la pression atmosphérique pendant une période de dix-sept ans (De janvier 1997 à octobre 2013) avec une période d'acquisition de 30 minutes pour estimer les variations journalières et mensuelles moyennes du module de réfraction (M) et son gradient. L'analyse des résultats obtenus a montré que :

- 1) le module de réfraction a des valeurs plus élevées pendant la saison des pluies qui dure de mars à octobre dans cette région.
- 2) pour les variations journalières du module de réfraction on observe des valeurs maximales pendant les heures matinales et la nuit. Les valeurs minimales se situent entre 15h :00 et 18h :00 pendant la saison sèche et entre 17h :00 et 19h :00 pendant la saison pluvieuse. Dans (AbouAlmal, Abd-Alhameed,R., Jones,S. & AlAhmad, 2014b) les auteurs ont utilisé les paramètres météorologiques enregistrées pendant 12 ans (de 1997 à 2005) dans les Émirats Arabes Unis pour déterminer les variations moyennes mensuelles, saisonnières, ainsi que les distributions cumulatives des gradients du coïndice à une hauteur de 100 m par rapport au sol.

1.2.2 Méthodes basées sur l'utilisation des données mesurées au sol

Dans (AbouAlmal *et al.*, 2013b) les données locales des paramètres météorologiques de 9 années (de 1997 à 2005) ont été utilisées pour calculer le gradient du coïndice de réfraction. Les variations mensuelles et annuelles moyennes de ce paramètre ont été analysées et les valeurs sont comparées avec les valeurs recommandées de l'UIT. Cette étude a montré que les valeurs mensuelles varient d'un mois à l'autre. Les valeurs les plus faibles se trouvent pendant la saison d'été (particulièrement en mai et juin) et les plus grandes valeurs pendant la saison d'hiver (particulièrement en janvier et décembre). Cette même étude a démontré que les valeurs annuelles moyennes du gradient du coïndice de réfraction diminuent d'une année à l'autre. Ces résultats indiquent une probabilité croissante d'occurrence de propagation anormale

dans la région du Golfe qui est probablement causée par les changements climatiques. Dans (Abdulhadi & Kifah, 2010) les auteurs ont calculé le facteur multiplicatif du rayon terrestre, k et le gradient du coïncide de réfraction aux Émirats Arabes unis en utilisant les valeurs mesurées localement des paramètres météorologiques pendant 14 ans (de 1990 à 2003). Les valeurs obtenues ont été utilisées pour étudier leur impact sur la conception de liaisons par micro-ondes. Il a été fortement recommandé d'utiliser les valeurs obtenues localement si on désire obtenir une meilleure performance et une plus grande disponibilité des liaisons hertziennes dans cette région car les valeurs obtenues étaient différentes des valeurs recommandées par l'UIT. Par exemple, pour k la médiane recommandée est 1.33, tandis que la médiane obtenue expérimentalement est de 1.83. Dans (Oluwole, Famoriji, 2013) les auteurs ont analysé l'effet des variations des paramètres météorologiques sur la valeur du coïndice pendant les saisons sèches et pluvieuses de l'année 2013 dans la région où est située la station 'Akure' (située au sud-ouest du Nigeria). Les moyennes journalières du coïndice pendant le temps sec (en janvier) et le temps pluvieux (en août) ont été calculées à partir des données obtenues de l'agence métrologique du Nigeria. Les moyennes quotidiennes du coïncide pendant la saison pluvieuse étaient supérieures à celles obtenues pendant la saison sèche en raison de la différence des valeurs des variations de la température, de l'humidité et de la pression atmosphérique. Cette étude a établi clairement que les variations des paramètres météorologiques affectent la valeur du coïndice de réfraction dans le Sud-Ouest du Nigéria. Les valeurs du coïndice sont plus élevées pendant la saison pluvieuse par rapport aux valeurs observées pendant la saison sèche. Cela est dû principalement aux valeurs de la température et de l'humidité qui sont plus élevées pendant la saison des pluies par rapport à la saison sèche. Dans (Odedina, P. & Afullo, T., 2007) les auteurs ont déterminé le gradient du coïndice et le facteur géoclimatique en utilisant les données météorologiques enregistrées pendant neuf mois à Durban, en Afrique du Sud et à Maun en Botswana. Le facteur géoclimatique, qui est l'un des plus importants paramètres pour la conception des liaisons terrestres a été calculé. La valeur moyenne du facteur géoclimatique pour Durban est plus élevée par rapport à celle du Botswana. La valeur mensuelle la plus élevée du facteur géoclimatique à Durban est celle du mois de février. Donc, le mois de février est le pire moi à Durban. La valeur moyenne mensuelle la plus élevée du facteur géoclimatique à Botswana est celle du

mois de décembre. Donc, le mois de décembre est le pire mois à Botswana. Dans le futur les auteurs comptent utiliser les données enregistrées pendant plusieurs années afin d'améliorer les résultats de l'estimation des indices. Dans (Akinwumi,S., Omotosho,T., Willoughby,A., Mandeep,J. & Abdullah, 2015) la variation mensuelle et saisonnière de N au sol et la densité de la vapeur d'eau ont été étudiées en utilisant les données enregistrées pendant 30 ans par 48 stations au Nigeria. Selon cette étude :

1) les facteurs qui influencent plus la transmission des signaux microondes opérant dans la troposphère sont la vapeur d'eau et la réfractivité. Les résultats obtenus montrent également que N au sol et la densité de la vapeur d'eau ont généralement des valeurs plus élevées au cours de la saison des pluies par rapport à la saison sèche dans toutes les régions où sont situées les 48 stations.

2) il existe une variation saisonnière de N avec des valeurs élevées pendant la saison des pluies et des faibles valeurs pendant la saison sèche. 3) la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère diminue en partant du sud vers le nord. La région du nord connaît des fortes valeurs de la réfractivité et de la densité de vapeur d'eau pendant la période de juin à août, tandis que la région sud expérience des hautes valeurs de ces paramètres pendant la période de mars à mai.

4) toutes les six zones éprouvent des faibles valeurs de la réfractivité et de la densité de vapeur d'eau pendant la période de décembre à février.

Pour améliorer la performance des liaisons terrestres à travers le Nigeria, l'étude recommande de tenir compte de la variabilité des paramètres climatiques pendant la conception des systèmes. Dans (Ayantunji,B., Okeke,P. & Urama,J., 2011) l'étude de la variation saisonnière de N au sol au Nigeria a été étudiée en utilisant les valeurs enregistrées des paramètres météorologiques pendant deux années provenant de huit stations au Nigeria. Les résultats montrent que N au sol a généralement des valeurs plus élevées pendant la saison des pluies. Les résultats montrent également que la valeur de N au sol augmente en passant de la région aride du nord à la zone côtière du sud. Dans (Famoriji & Olayinka,Oyeleye, 2013) les auteurs indiquent que la variation de la réfractivité dans la troposphère conduit à une diminution de la vitesse ou du taux de propagation des ondes. Ce qui finit par causer un retard de propagation ou une atténuation dans la troposphère. Les valeurs horaires moyennes de N pendant la saison sèche ont été calculées à

partir des données de l'Agence météorologique du Nigeria (NIMET) en provenance de la station située dans la ville Akure au Nigeria. L'analyse des résultats obtenus a montré qu'il existe une forte corrélation négative (avec un coefficient de corrélation de -0,97) entre N et la puissance du signal reçu. Pendant la nuit et le matin, l'humidité est élevée ce qui augmente la valeur de N. Dans ces conditions la puissance du signal était faible. Au contraire pendant le jour, l'humidité était faible en raison de la température élevée, ce qui diminue la valeur de N. Dans ce cas la puissance du signal était élevée. Donc, plus la réfractivité est élevée, plus la puissance du signal au point d'observation dans la troposphère est faible. Dans (Valma, Tamosiunaite, Tamosiunas, Tamosiuniene & Zilinskas, 2010) en considérant que les valeurs de N et son gradient sont les paramètres qui déterminent la qualité de la propagation des ondes radioélectriques microondes et que ces deux paramètres dépendent de la température, de la pression atmosphérique et la pression de vapeur d'eau, les auteurs recommandent de tenir compte des données géographiques et météorologiques locales pendant la conception des liaisons hertziennes. Par exemple les valeurs de N à Klaipėda et Kaunas sont plus élevées que dans d'autres régions de la Lituanie peu importe la saison. Les variations journalières moyennes des valeurs de N est de l'ordre de 14.1 unités N se situent en juillet pour les villes de Vilnius, Mažeikiai et Kaunas. À Klaipėda, la valeur maximale de la variation journalière moyenne de N est de 4.16 unités N. La valeur minimale de N a été observée en février dans toutes les régions considérées. Dans (Akpootu,D. & Iliyasu,M., 2017) une analyse à long terme de l'influence des variations des paramètres météorologiques sur la qualité de la propagation des ondes radioélectriques a été décrite. L'analyse est basée sur la détermination de N et dN/dh ainsi que du facteur multiplicatif du rayon terrestre à l'aide des valeurs des paramètres météorologiques enregistrées pendant douze ans. Les résultats de cette analyse sont les suivants :

- 1) la valeur moyenne de N pendant les saisons pluvieuses est supérieure à celle obtenue pendant les saisons sèches.
- 2) les valeurs maximale et minimale of N sont observées en avril et janvier respectivement.
- 3) les valeurs de N et de la pression atmosphérique sont plus grandes pendant les saisons pluvieuses par rapport aux saisons sèches. Cette remarque est aussi valable concernant l'humidité relative.
- 4) la composante sèche de N contribue à 67.98% de la valeur totale de N. Mais la composante

humide est la principale cause de la variation de N .

5) les valeurs obtenues de $dN1$ et de K indiquent que la super-réfraction est le phénomène de propagation anormale le plus fréquent pour la région étudiée. Au Canada, une étude récente sur les liaisons terrestres concernant les probabilités d'interruption de certains sites au Québec sur deux années a été réalisée (Agba, B. & BEN SIK ALI, 2012; Agba, Ben Sik Ali, Morin & Bergeron, 2011). Les résultats obtenus ont été comparés aux prédictions théoriques en utilisant UIT-R P.530. Cette comparaison montre que si les données mesurées suivent la tendance prédite par la théorie, les valeurs de données peuvent être différentes. Des résultats et des observations similaires ont été rapportés indépendamment par d'autres auteurs (ITU, 2007a). D'autre part et presque en parallèle, une autre étude a été réalisée au Royaume-Uni, les données enregistrées pendant vingt ans ont été comparées à la prédiction par le modèle de l'UIT. L'analyse des données a montré que l'indisponibilité de la liaison 'Backhaul' à cause de la pluie a augmenté (Paulson, 2011). Les auteurs ont suggéré que les recommandations de l'UIT, qui considèrent un climat stationnaire, doivent être améliorées pour intégrer les changements climatiques dans l'analyse des données et les modèles prédictifs. En résumé, le coïndice de réfraction et son gradient (N et $dN1$), le module de réfraction (M), le facteur géoclimatique (K) et le facteur multiplicatif du rayon terrestre (k) sont les indices utilisés pour déterminer la qualité de la propagation des ondes radioélectriques. Ces indices dépendent de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité relative de l'air. La sous-section 1.3 décrit la méthodologie qui sera utilisée dans ce travail pour déterminer les indices utilisés pendant la conception des liaisons hertziennes. Dans le chapitre 2 de ce document nous verrons comment déterminer et utiliser le facteur géoclimatique pour analyser la disponibilité des quatre liaisons d'Hydro-Québec.

1.3 Méthodologie utilisée pour l'estimation de N et son gradient

La section 1.3.1, après l'introduction de la notion de la réfraction atmosphérique, décrit la procédure d'estimation du coïndice de réfraction N et son gradient $dN1$, ainsi que du facteur géoclimatique. Cette estimation est basée sur la détermination des valeurs des paramètres météorologiques à une certaine altitude à partir des valeurs mesurées au sol de ces paramètres.

La section 1.3.2 introduit la notion du rayon terrestre fictif pour déterminer le trajet de l'onde radioélectrique. Les effets de la réfraction atmosphérique sur la qualité de la propagation des ondes radioélectriques sont décrits dans la section 1.3.3. La section 1.3.4 donne les conclusions.

1.3.1 Estimation de N, dN1 et K : Notion de la réfraction atmosphérique

La réfraction se manifeste par la courbure d'un rayon lumineux ou d'un trajet de l'onde radioélectrique si l'indice de réfraction du milieu de propagation est variable. Dans ce cas le milieu de propagation est l'atmosphère et plus précisément sa couche la plus proche de la surface terrestre, la troposphère. L'indice de réfraction de l'atmosphère est désigné par n , c'est le rapport de la vitesse de la propagation des ondes radioélectriques dans le vide et la vitesse correspondante dans l'atmosphère. Il est déterminé par la formule suivante (Sizun & Fornel, 2005) :

$$n = \sqrt{\epsilon \times \mu} \quad (1.1)$$

Où ϵ est la permittivité relative et μ est la perméabilité relative. Pour ces paramètres l'utilisation de l'indice r (pour désigner un paramètre relatif) sera omis pour une raison de simplicité des équations.

En pratique, on utilise N à la place de n car la variation de n par rapport à sa valeur moyenne (1.0003) est très faible (les variations apparaissent aux cinquième et sixième décimales). Les indices n et N sont liés par la relation suivante (Sizun & Fornel, 2005; ITU, 2017a) :

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (1.2)$$

La valeur de N à une hauteur donnée, h est, (ITU, 2017a) :

$$N(h) = N_{sec}(h) + N_{hum}(h) \quad (1.3)$$

Où :

$$N_{sec}(h) = \frac{77.6}{T(h)} \times P(h) \quad (1.4)$$

$$N_{hum}(h) = \frac{373256}{T^2(h)} \times e(h) \quad (1.5)$$

où :

$P(h)$ est la pression atmosphérique en hPa (hectopascal) ;

$e(h)$ est la pression de la vapeur d'eau en hPa ;

$T(h)$ est la température absolue en K.

Les termes $N_{sec}(h)$ et $N_{hum}(h)$ dans l'équation (3.3) sont appelés les termes sec et humide du coïndice de réfraction respectivement. Le terme sec apporte la plus grande contribution (60 à 80%) à la valeur de $N(h)$. Selon la saison, ces deux termes subissent diverses variations. Par exemple, en été, le terme humide augmente et le terme sec diminue car pendant l'été les températures sont élevées et l'humidité est basse. En hiver, les tendances sont inversées.

Les équations (1.4) et (1.5) montrent que N dépend des valeurs des paramètres météorologiques à une altitude h donnée. Les stations qui seront utilisées dans ce document ne fournissent que les valeurs mesurées au sol des paramètres météorologiques. Pour estimer les valeurs de ces paramètres à une altitude h donnée, nous avons utilisé les formules fournies dans (ITU, 2017b). La température $T(h)$ est donnée par :

$$T(h) = T_s - 6.5 \times h \quad (1.6)$$

Où est la température absolue en Kelvin au sol. La formule suivante est utilisée pour déterminer la pression atmosphérique totale :

$$P(h) = P_s \times \left(\frac{T_s}{T_s - 6.5 \times h} \right)^{-5.2558} \quad (1.7)$$

Où P_s est la pression en hPa au sol. La pression de vapeur d'eau en hPa est déterminée par (ITU, 2017a) :

$$e(h) = \frac{\rho(h) \times T(h)}{216.7} \quad (1.8)$$

Où $\rho(h)$ est la densité de la vapeur d'eau en g / m³. Elle est déterminée par (ITU, 2017b) :

$$\rho(h) = \rho_s \times e^{-\frac{h}{2}} \quad (1.9)$$

Où s est la valeur de la densité de la vapeur d'eau au sol.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer s . Dans cette étude, les formules suivantes ont été utilisées (Liebe, H., 1987) :

$$\rho_s = \frac{H_s \times \theta^6}{5.752} \times 10^{10-9.834 \times \theta} \quad (1.10)$$

Où :

$$\theta = \frac{300}{T_s} \quad (1.11)$$

H_s et T_s sont l'humidité (en hPa) et la température absolue en Kelvin au sol respectivement.

L'humidité relative $H(h)$ en

$$H(h) = 100 \times \frac{e(h)}{e_s(h)} \quad (1.12)$$

Où $e_s(h)$ est déterminée selon (Jonhsnhweather, 2018) par :

$$e_s(h) = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \times t(h)}{237.7 + t(h)}} \quad (1.13)$$

Où $t(h)$: est la température $T(h)$ convertie en degrés Celsius.

Pour analyser l'impact de la réfraction atmosphérique sur la propagation des ondes radioélectriques on utilise le gradient du coïndice de réfraction. Jusqu'à une altitude de 1 km au-dessus de la surface de la terre, les mesures ont montré que ce gradient peut être considéré constant. La valeur de $dN1$ (unités N/km) à une hauteur h par rapport au sol est déterminée à l'aide de la formule suivante (AbouAlmal *et al.*, 2013b; Abdulhadi & Kifah, 2010)

$$dN1 = \frac{N(h) - N_s}{h} \quad (1.14)$$

où $N(h)$ est le coïndice de réfraction à la hauteur h (65 m dans ce cas), N_s (en unités N) est le coïndice de réfraction au sol, c'est-à-dire à la hauteur $h = 0$. L'organigramme de la figure 1.2 résume la procédure pour déterminer les valeurs des paramètres météorologiques, ainsi que celles de $N(h)$ à une hauteur h par rapport au sol et $dN1$.

Remarque 1 : Dans certains cas à la place de N et $dN1$ on utilise le module de réfraction M et son gradient dM/dh respectivement. Dans ce cas on considère que la propagation s'effectue

au-dessus d'une terre plate dans un milieu dont le coindice de réfraction est M . La valeur du module $M(h)$ est déterminée par (ITU, 2019) :

$$M(h) = N(h) + 0.157 \times h \quad (1.15)$$

Remarque 2 : Un autre indice qui est utilisé pour l'analyse de l'impact des paramètres météorologiques, ainsi que de la rugosité du terrain est le facteur géoclimatique, (ITU, 2007b) :

$$K = 10^{-4.4-0.0027 \times dN1} \times (10 + S_a)^{-0.46} \quad (1.16)$$

Où : (en m) est la rugosité du terrain. Il est défini comme l'écart-type des hauteurs de terrain dans une zone de 110 km $\times$ 110 km. Notons qu'il est facile d'avoir une bonne précision de rugosité en utilisant des données topographiques de haute résolution.

$dN1$ (en unités N/Km) est la valeur du gradient de réfractivité à une hauteur de 65 m du sol qui correspond à un pourcentage de temps égal à 1% sur la courbe de la distribution cumulative moyenne annuelle.

Notons que le calcul théorique du gradient de réfractivité repose uniquement sur la précision de bases données de l'UIT à moins de disposer de données locales de grande précision. Dans ce cas le gradient de réfraction est défini par :

$$dN1 = \frac{dN}{dh} = 0.35 \times \frac{dP}{dh} - 1.3 \times \frac{dT}{dh} - 7 \times \frac{dH}{dh} \quad (1.17)$$

$$H = \frac{100 \times e}{e_s} \quad (1.18)$$

Avec :

$$e_s = EF \times a \times \exp \left(\frac{(b - \frac{t}{d}) \times t}{t + c} \right) \quad (1.19)$$

Où : e (hPa) est la pression partielle de vapeur d'eau, T (K) est la température absolue, H (%) est la pression relative, t (°C) est la température, h (km) est l'altitude, P (hPa) est la pression atmosphérique, e_s (hPa) est la pression partielle de saturation de vapeur d'eau. Les valeurs représentatives de $dN1$, EF , ainsi que celles des coefficients a , b , c sont données par la

recommandation UIT-R P.453-10.

Si on néglige la rugosité du terrain, alors (ITU, 2007b) :

$$K = 10^{-4.4-0.0027 \times dN1} \quad (1.20)$$

1.3.2 La courbure du rayon radioélectrique : Notion du rayon terrestre fictif

La réfraction atmosphérique provoque la courbure du trajet de l'onde radioélectrique. Dans la suite de ce document le trajet de l'onde radioélectrique sera appelé rayon radioélectrique. Pour tenir compte de la courbure du rayon radioélectrique lorsque la propagation se passe au-dessus d'une terre réelle dont le rayon est 'a' on utilise la notion du rayon terrestre équivalent, R. Le rapport R/a est appelé le facteur multiplicatif du rayon terrestre k. Si on considère que le coïndice N varie linéairement lorsque l'altitude augmente dans la direction verticale et ne varie pas dans la direction horizontale, alors on démontre que la valeur de k est définie par (ITU, 1996b) :

$$k = \frac{157}{157 + dN1} \quad (1.21)$$

La figure 1. 3 montre quelques rayons radioélectriques entre l'émetteur et le récepteur pour certaines valeurs de k (Lehpamer, 2010). La figure 1.3 montre que plus la valeur de k est petite, plus le rayon radioélectrique se rapproche des obstacles. C'est pour cette raison qu'il faut tenir compte de la valeur de k pour déterminer la hauteur des antennes afin d'éviter l'obstruction du trajet direct par les obstacles naturels du terrain et/ou les immeubles entre l'émetteur et le récepteur.

1.3.3 Les effets de la réfraction atmosphérique

La valeur du gradient dN/dh détermine le type de propagation des ondes radioélectriques qui peut prendre place. Selon la valeur de dN/dh on distingue les types de propagation des ondes radioélectriques énumérés dans le tableau 1.1. La figure 1.4 montre les rayons radioélectriques selon la valeur de dN/dh . Cette figure est une adaptation de la figure donnée dans (ITU, 2013).

TABLEAU 1.1 Les types de propagations

dN/dh, unités N/km	Type de propagation
-157 à -79	Super-réfraction
Inférieur à -157	Conduit
Supérieur à -79	Sub-réfraction

Le gradient normal du coïndice de réfraction a une valeur égale à -39 unités N/km. Cette valeur correspond à la valeur médiane du gradient sur le premier kilomètre d'altitude dans une atmosphère standard. La valeur critique de dN1 est égale à -157 N/km. Pour cette valeur $k = 1$ et l'onde radioélectrique se propage à une altitude constante au-dessus du sol. Donc, le rayon radioélectrique est parallèle à la courbure de la terre réelle, comme illustré à la figure 1.4.

La super-réfraction est une anomalie de la propagation des ondes radioélectriques qui apparaît quand la valeur de dN1 est comprise entre -157 unités N/km et -39 unités N/km. Cela arrive lorsque les conditions climatiques sont telles que les variations de la température et de l'humidité conduisent à une augmentation du coïndice lorsque l'altitude augmente. Dans ce cas comme le montre la figure 1.4 le rayon radioélectrique se courbe vers la surface de la terre.

Lorsque la valeur de dN1 est inférieure à -157 unités N/km la courbure du rayon radioélectrique est telle que ce dernier peut être réfléchi par la surface de la terre (voir figure 1.4). Dans ce cas on parle de conduit. Selon l'état de la troposphère on distingue quelques types de conduits.

La sub-réfraction prend place lorsque la valeur de dN1 est supérieure à -39 unités N/km. Dans ce cas le rayon radioélectrique s'éloigne de la surface de la terre.

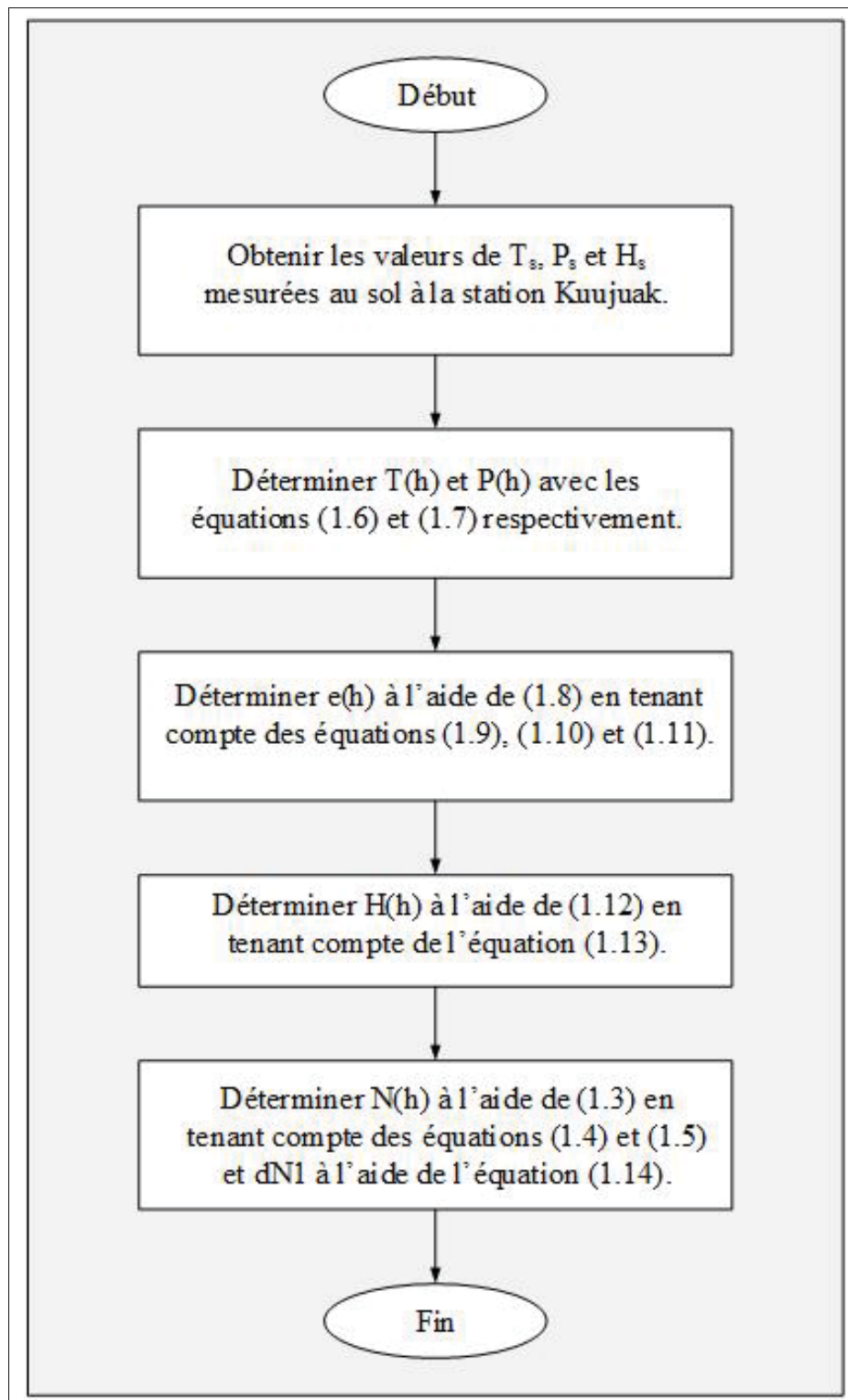


FIGURE 1.2 L'organigramme pour déterminer $N(h)$ et $dN1$

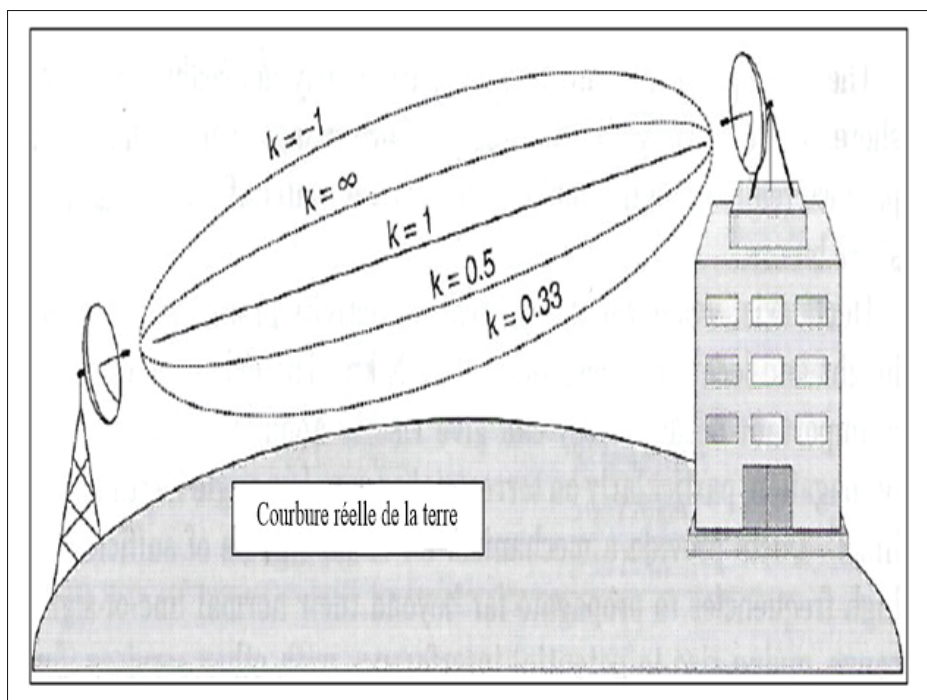


FIGURE 1.3 Rayons radioélectriques pour certaines valeurs de k

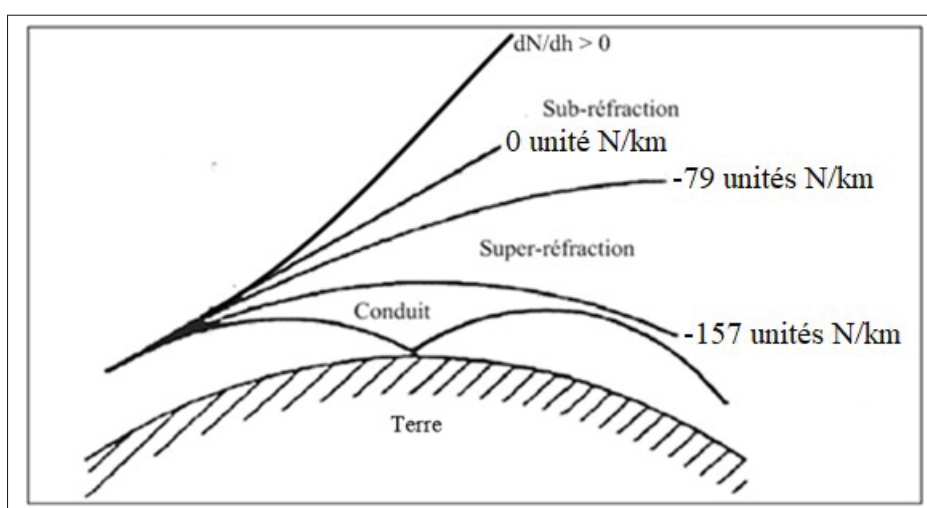


FIGURE 1.4 Rayons radioélectriques selon la valeur de dN/dh

CHAPITRE 2

ANALYSE DE LA DISPONIBILITÉ DES LIAISONS HERTZIENNES

Les recherches ont démontré que la performance d'une LH est influencée par la fréquence de l'onde, la rugosité du terrain et les paramètres météorologiques. Afin de tenir compte de l'influence de la rugosité du terrain, ainsi que des paramètres météorologiques on utilise le facteur géoclimatique K . La probabilité d'interruption de la liaison de télécommunications est directement proportionnelle au facteur géoclimatique. L'impact des paramètres météorologiques dans le facteur géoclimatique est exprimé à l'aide de dN_1 . En se basant sur les données expérimentales des certaines liaisons terrestres situées au Québec, Canada, nous avons constaté qu'il y a une variation saisonnière du facteur géoclimatique et que cette variation est principalement due à la variation de l'humidité. Nous verrons également que le facteur géoclimatique varie d'une année à une autre. Pour cette raison il est nécessaire de mettre à jour les recommandations de l'UIT qui ne tiennent pas compte actuellement des changements climatiques dans l'estimation du facteur géoclimatique. Dans ce chapitre, nous étudions particulièrement la variabilité du facteur géoclimatique sur une période d'un an, 2009-2010 pour quatre liaisons hertziennes terrestres au Québec. Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. Les sections 2.1 et 2.2 décrivent la méthodologie utilisée pour déterminer la valeur théorique et expérimentale du facteur géoclimatique respectivement. Dans la section 2.3 on détermine les valeurs saisonnières du facteur géoclimatique mesuré K_{mes} . La section 2.4 donne une analyse détaillée de la variation saisonnière de K_{mes} . La section 2.5 présente les conclusions.

2.1 Évaluation théorique du facteur géoclimatique

Conformément à la recommandation (ITU, 2007b), l'impact de climat sur l'indisponibilité des liaisons est incorporé dans le facteur géoclimatique, K . Ce facteur est lié au climat à travers le gradient de réfractivité qui dépend lui-même de la pression, de la température et de l'humidité. Tous ces paramètres sont soumis à des variations saisonnières et, au fil du temps, au changement climatique. Par conséquent, afin de prendre en compte la variation du climat, saisonnière ou sur

de longues périodes, On doit se concentrer sur ce facteur. Actuellement, la pratique courante consiste à considérer une valeur constante pour K, correspondant généralement au pire mois, pour dimensionner une LH dans une région donnée. Comme indiqué dans la section 1.3.1 du chapitre 1 de ce document pour quantifier l'influence des paramètres météorologiques, ainsi que de la rugosité du terrain sur la probabilité de l'indisponibilité des liaisons terrestres on utilise le facteur géoclimatique. La probabilité d'indisponibilité p_w en % est directement proportionnelle au facteur géoclimatique :

$$p_w = K \times d^{3.4} \times (1 + |\varepsilon_p|)^{-1.03} \times f^{0.8} \times 10^{(-0.00076 \times h_L - \frac{A}{10})} \quad (2.1)$$

Où : f (en GHz) est la fréquence de la liaison, d (km) est la longueur du trajet, (mrad) est l'amplitude de l'inclinaison du trajet, h_L (m) est l'altitude de l'antenne et A (dB) est la profondeur de l'évanouissement.

2.2 Détermination expérimentale du facteur géoclimatique

Il n'existe presque pas de données du Québec dans la base de données de l'UIT utilisées pour bâtir le modèle UIT. Même s'il existe des données des autres régions qui ont un climat similaire à celui du Québec, il serait utile d'ajouter les données qui sont propres à la province du Québec. Ainsi, à partir d'avril 2009, une collecte des données sur 4 liaisons dans des régions différentes du Québec a commencée. La figure 2.1 montre l'emplacement géographique de ces 4 liaisons. Toutes les liaisons fonctionnent à une fréquence $f = 7.425$ GHz et utilisent la diversité d'espace (2 ou 4 récepteurs). La plage des distances de liaison est de 50 à 90 km. L'équipement radio utilisé est livré avec un logiciel embarqué qui fournit plusieurs mesures, comme les niveaux de signal, la fiabilité et les durées d'indisponibilité. Initialement les données sont enregistrées dans des fichiers au format CSV brut. Pour faciliter la manipulation des données enregistrées les fichiers sont convertis en fichiers Excel ou texte.

La méthodologie utilisée pour déterminer la valeur expérimentale (K_{mes}) du facteur géoclimatique est composée de trois étapes (Bettouche, Kouki, A., Agba, Basile & Ben Sik Ali, 2007) :

1) Étape 1 : décomposition des données enregistrées en périodes mensuelles ;



FIGURE 2.1 Localisation géographique des 4 liaisons surveillées

2) Étape 2 : estimation de la probabilité d'indisponibilité.

3) Étape 3 : estimation de K_{mes} .

Détaillons à présent chacune des étapes mentionnées ci-dessus.

Étape 1 : Selon la recommandation UIT-R P.530-13, l'analyse considère des périodes mensuelles. Pour cette raison à cette étape les données enregistrées sont divisées en périodes mensuelles. Par exemple, pour la liaison 1, les données pertinentes disponibles couvrent une durée de 605 jours. Ces données sont réparties en périodes successives d'environ 30 jours.

Étape 2 : À cette étape on estime la probabilité d'indisponibilité de la liaison en tenant compte des valeurs enregistrées. Pour une raison de simplicité considérons les variables suivantes : $X_{s\acute{e}van}$ est la puissance reçue optimale après la radio propagation des ondes dans des conditions idéales sans évanouissement, $X_{re\acute{c}u}$ est la puissance reçue du signal et A est la marge d'évanouissement dont la valeur est fixée dans l'intervalle : de -5 dB à 40 dB. Pour chaque valeur de A on :

- 1) détecte l'apparition d'un événement d'indisponibilité si $X_{re\acute{c}u}$ est inférieure à $(X_{s\acute{e}van} - A)$.
- 2) détermine la durée (t) de l'événement d'indisponibilité à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2.2)$$

où :

t_1 est le premier instant lorsque la condition $X_{reçu}$ est inférieure à $(X_{s_évan} - A)$ est remplie.

t_2 est l'instant suivant lorsque la condition $X_{reçu}$ est inférieure à $(X_{s_évan} - A)$ n'est plus remplie.

La durée Δt de l'événement d'indisponibilité est montrée à la figure 2.2. 3) les durées de tous

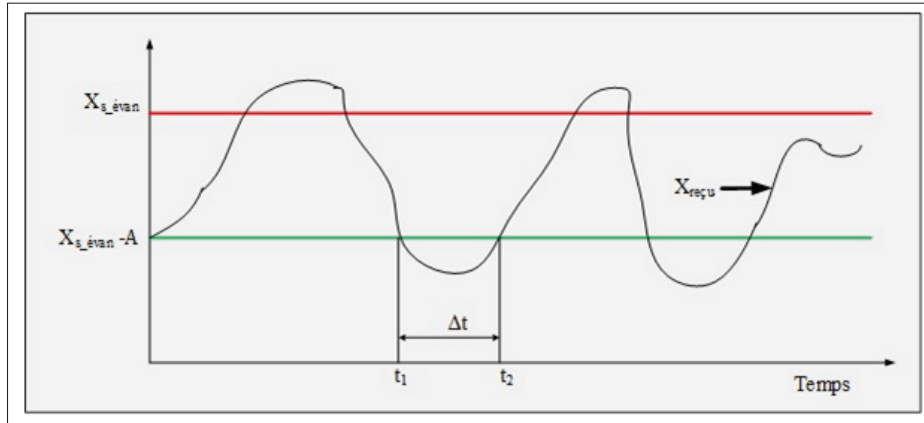


FIGURE 2.2 La durée de l'événement d'indisponibilité

les événements de panne sont calculées de la même manière. La panne du mois équivaut à la somme de tous les événements de panne pendant la période analysée. Avec ces données, la probabilité d'indisponibilité, p_w , peut être calculée.

Cette procédure permet de tracer les distributions cumulatives des évanouissements (p_w) en fonction de la marge d'évanouissement, A .

Étape 3 : À cette étape on estime la valeur du facteur géoclimatique K_{mes} . Il existe quelques méthodes pour l'estimation de K_{mes} (Liebe, 1987). Ici la méthode proposée par la recommandation UIT R-P.530-13 sera utilisée. La procédure est la suivante. 1) on trace la courbe de la distribution cumulative des évanouissements du pire mois sur un graphe semi-logarithmique, comme illustré à la figure 2.3 (Doe, Doe & Doe, 2013). 2) Sur la courbe de la figure 2.3 on mesure la profondeur d'évanouissement $A1$ au-delà de laquelle la probabilité d'indisponibilité, p_{w1} est approximativement linéaire. p_{w1} est la probabilité d'indisponibilité la plus élevée possible avec une courbe linéaire approximative.

3) On détermine la valeur de K_{mes1} pour le site 1 de la liaison considérée à l'aide de l'équation (2.1) en remplaçant K par K_{mes1} , A et p_w par $A1$ et p_{w1} respectivement. On procède de la

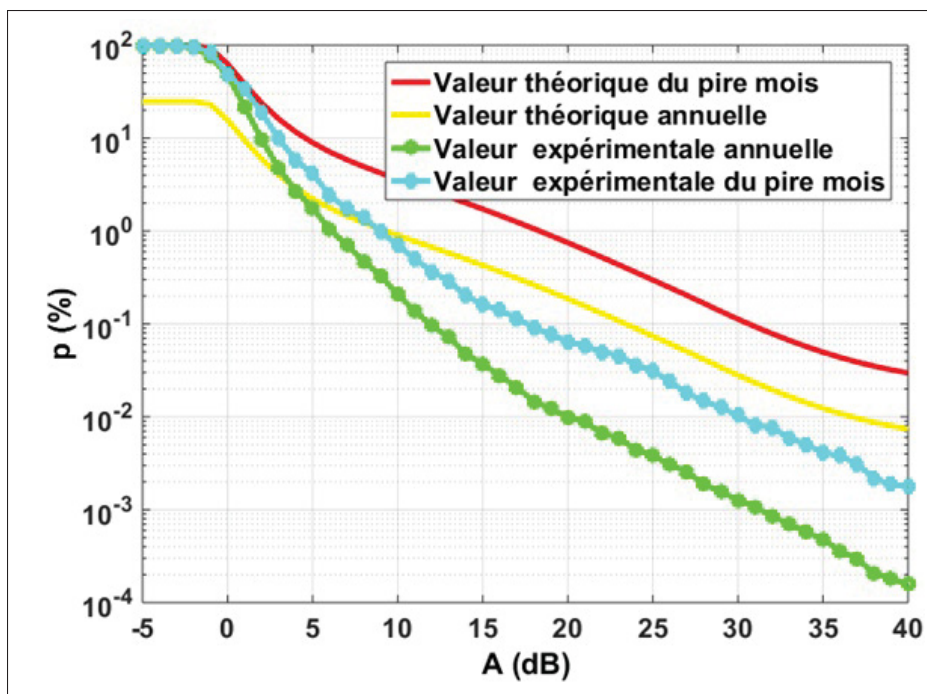


FIGURE 2.3 Illustration de l'approche utilisée (méthode UIT)

même façon pour déterminer la valeur de K_{mes2} pour le site 2 de la liaison. Par exemple, pour la liaison caron-chamouchouane, on calculera cette valeur sur le site Caron et sur le site Chamouchouane. Ensuite on calcule la valeur moyenne du facteur K_{mes} des deux sites. La valeur obtenue de K_{mes} est comparée avec la valeur théorique K_{th} calculée au milieu de la liaison.

Le tableau 2.1 ci-dessous montre les valeurs du facteur géoclimatique mesuré et théorique des quatre liaisons pour les années 2009 et 2010. Le tableau 2.1 montre que :

TABLEAU 2.1 Les valeurs de K_{mes} et K_{th}

Liaisons	K_{mes}		K_{th}
	2009	2010	
1	7.32E-05	1.12E-04	2.16E-05
2	5.15E-05	7.76E-05	2.53E-05
3	1.97E-05	2.89E-05	2.79E-05
4	3.35E-05	4.33E-04	3.6E-05

1) pour une liaison donnée la valeur les valeurs de K_{mes} et K_{th} sont différentes.

2) peu importe la liaison les valeurs du facteur géoclimatique des années 2009 et 2010 sont différentes. En particulier les valeurs de ce facteur en 2010 sont plus élevées par rapport à celles de 2009. Cela est dû aux changements climatiques au cours de ces années. En effet selon les données de l'environnement Canada la température moyenne en 2010 était 2.9°C supérieure à la normale (Jonhshweather, 2018).

2.3 Détermination des valeurs saisonnières de Kmes

La procédure décrite à la section 2.1 de ce document a été utilisée pour estimer les valeurs de Kmes pendant les quatre saisons : Printemps (KmesP), hiver (KmesH) automne (KmesA) et été (KmesÉ) selon la liaison et l'année. Le tableau 2.2 montre les valeurs obtenues. Les figures 2.4

TABLEAU 2.2 Les valeurs de Kmes et Kth

Liaisons	Années	KmesP	KmesH	KmesA	KmesÉ
1	2009	1.59E-04	1.81E-04	9.57E-04	2.76E-05
2	2010	4.00E-05	7.90E-05	4.90E-05	1.22E-06
3	2009	3.47E-05	6.23E-05	2.60E-05	2.61E-05
4	2010	1.28E-04	1.32E-04	7.19E-05	7.19E-05

et 2.5 montrent la représentation graphique des valeurs de Kmes selon la saison des liaisons 1 et 4 respectivement.

2.4 Analyse de la variation saisonnière de Kmes

L'analyse des valeurs de Kmes données dans le tableau 2.3 permet de dire que faire les remarques suivantes :

- 1) il existe une variation saisonnière de la valeur mesurée du facteur géoclimatique.
- 2) pour les quatre liaisons la valeur de Kmes en été est la plus faible.
- 3) pour la liaison 4 d'une part les valeurs de Kmes en hiver est presque la même que celle du printemps et d'autre part les valeurs de Kmes en automne est la même que celle de l'été. Donc, pour cette liaison selon les valeurs de Kmes on peut dire qu'on a en réalité 2 grandes saisons : Hiver-printemps et Automne-été.

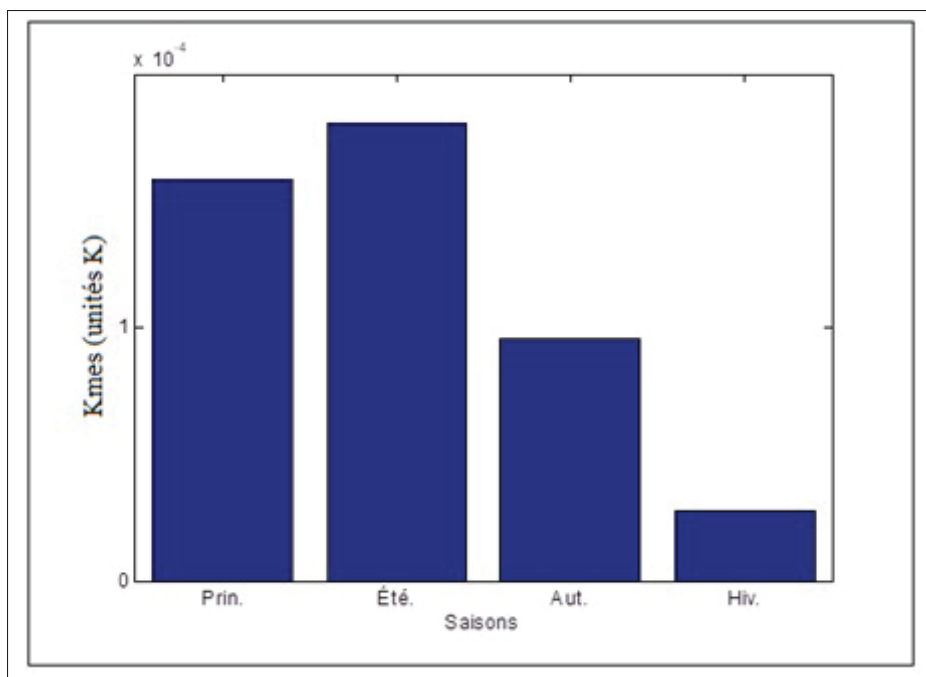


FIGURE 2.4 Valeurs de Kmes pendant les quatre saisons (Liaison 1)

Les remarques mentionnées ci-dessus concernant la variation saisonnière de Kmes peuvent être expliquées par les variations des paramètres météorologiques pendant les différentes saisons. Analysons les variations de ces paramètres dans les régions 1 et 4 où sont situées les liaisons 1 et 4 respectivement selon les données fournies par l'environnement du Canada (ITU, 2019). Pour une liaison donnée, le tableau 2.3 montre les limites de valeurs de H et T selon la saison.

TABEAU 2.3 Les valeurs de H et T selon la saison pour les liaisons 1 et 4

Liaisons	Printemps		Hiver		Automne		Été	
	H, %	T,	H, %	T	H, %	T	H, %	T
1	72 à 100	-5 à 10	70 à 77	-15 à -8	76 à 80	-2 à 11	80 à 100	13 à 19
4	56 à 97	4 à 15	74 à 100	-7 à -5	73 à 100	2 à 16	67 à 97	18 à 23

Le tableau 2.3 montre que pour :

1) la liaison 1, la valeur minimale de H est plus grande en été, automne, printemps et hiver respectivement. Ce paramètre a la plus grande influence sur la valeur du facteur géoclimatique.

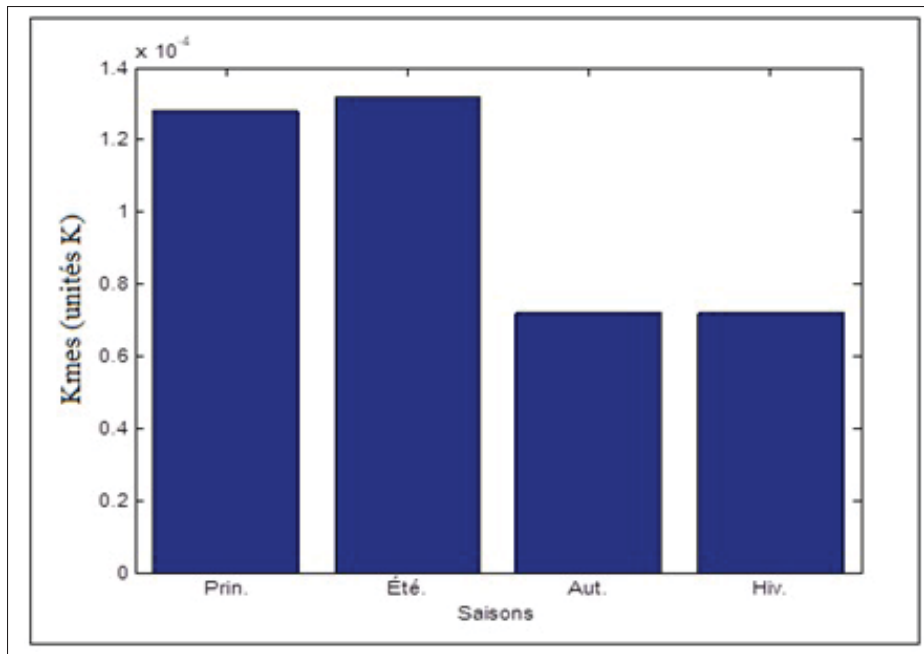


FIGURE 2.5 Valeurs de Kmes pendant les quatre saisons (Liaison 4)

Ce qui explique la relation obtenue entre les valeurs de Kmes selon la saison : $K_{mesÉ} > K_{mesA} > K_{mesP} > K_{mesH}$.

2) la liaison 4, les valeurs de H sont presque identiques pour les saisons d'hiver et d'automne d'une part et pour les saisons de printemps et d'été d'autre part. Par contre, les valeurs correspondantes des températures sont assez différentes. Malgré cette différence on observe les relations suivantes : $K_{mesH} \approx K_{mesA}$ et $K_{mesP} \approx K_{mesÉ}$.

3) les relations d'égalité ci-dessus entre les valeurs du facteur géoclimatique nous permettent de conclure que c'est l'humidité qui a plus d'influence sur la valeur de ce facteur.

l'estimation du facteur géoclimatique (K) selon la méthode UIT-R P.530-13 en se basant sur les mesures expérimentales des quatre liaisons au Québec, Canada est la principale contribution dans ce chapitre.

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE LA VARIATION À COURT-TERME DE N ET SON GRADIENT

Dans ce chapitre on donne dans un premier temps le découpage du territoire du Québec en zones et ensuite une analyse à court terme (une durée d'un an) des variations de N et son gradient (dN1). Les valeurs de N et dN1 ont été estimées en se basant sur la méthodologie décrite dans le chapitre 1 de ce document. Ce chapitre comporte trois sections. La section 3.1 est dédiée à l'étude de la variation de N dans les différentes régions du Québec qui ont été regroupées en 5 zones. La section 3.2 décrit l'influence d'un cours d'eau sur la variation de N en se basant sur les données des quatre stations. La section 3.3 donne une analyse détaillée des variations de N et dN1 dans la région nord-est du Québec.

3.1 Étude de la variation de N dans les zones identifiées

Pour l'identification des zones nous avons regroupé les stations utilisées dans l'étude en un nombre désiré de zones du nord au sud à l'aide d'un algorithme hiérarchique d'agglomération. Les données météorologiques (pression, température et humidité relative) utilisées dans l'analyse sont des données enregistrées au niveau des 50 stations situées dans différentes régions climatiques du Québec pour l'année 2013. Il s'avère que le meilleur critère pour l'identification des zones est la pression de vapeur d'eau. Les résultats obtenus montrent que N augmente du nord au sud et que les valeurs maximales pour toutes les zones sont observées en juillet ou en août. Cependant, la variation de N reste dans un intervalle relativement faible par rapport à la variation observée dans certains pays tropicaux, en particulier le Nigeria.

3.1.1 Regroupement des régions en zones

L'organigramme proposé pour le regroupement des stations en plusieurs zones consiste en quatre étapes principales, comme illustré à la figure 3.1 (Bettouche *et al.*, 2020b).

Détaillons les étapes de l'organigramme de la figure 3.1.

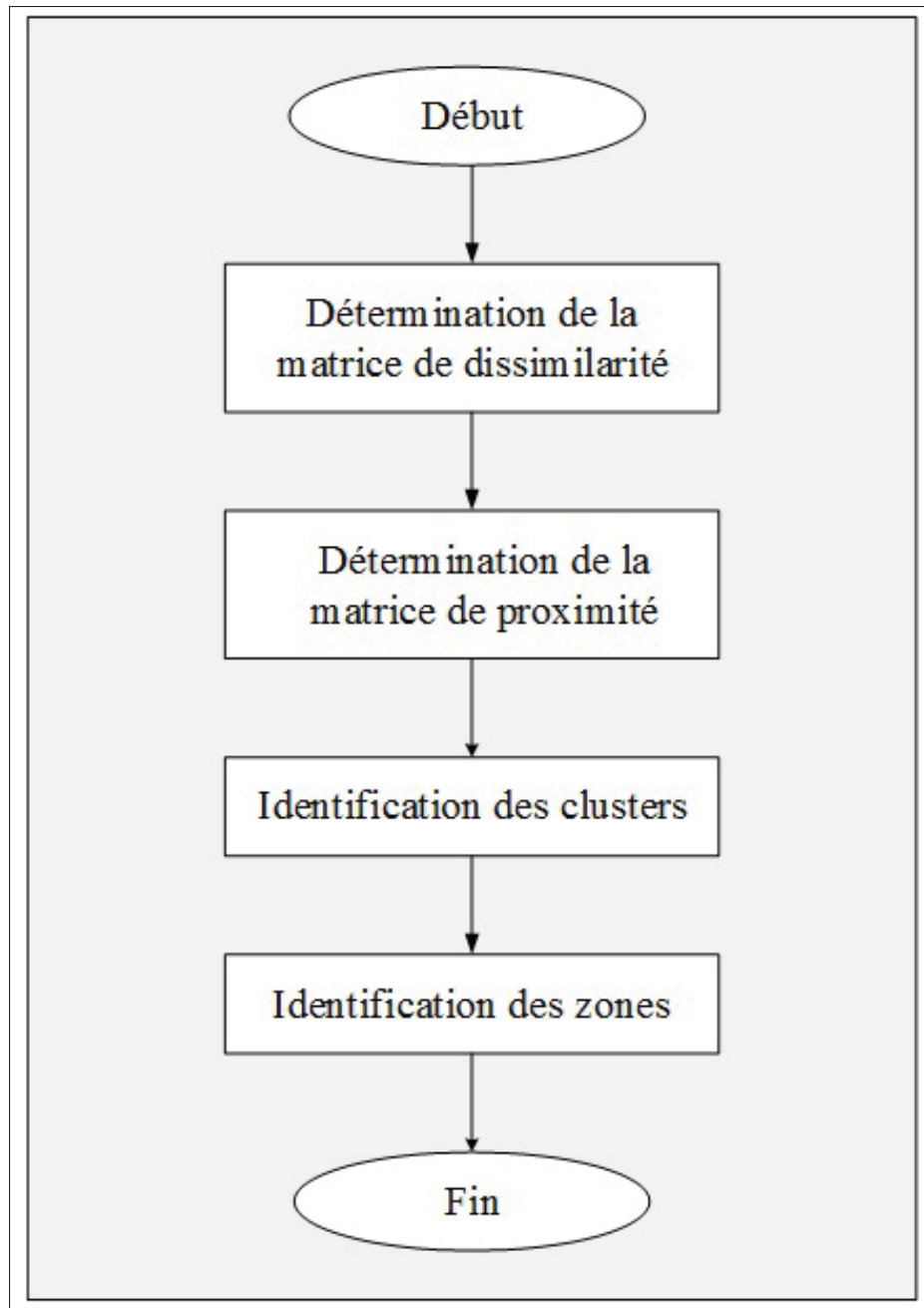


FIGURE 3.1 L'organigramme proposé pour le regroupement des stations en zones

1) Détermination de la matrice de dissimilarité

Dans la suite pour une raison de simplicité nous allons utiliser l'abréviation PM (pattern matrix en anglais) pour désigner la matrice de dissimilarité. Les données de PM doivent refléter la

proximité entre les stations. Par conséquent, le choix des données de cette matrice est très important. Dans ce cas, après quelques essais, nous avons constaté que le paramètre le plus approprié (qui permet de former les zones cohérentes avec un nombre minimum d'itérations) est la pression de vapeur d'eau e . Donc, PM a initialement 50 lignes (nombre de stations). Chaque ligne de PM comprend les 12 valeurs moyennes mensuelles de e pour une station donnée.

Notez qu'il est nécessaire de normaliser PM avant de procéder à la classification. Il existe plusieurs approches qui permettent de normaliser les données. Dans ce cas, les données de la matrice normalisée de PM, (qui sera désignée par NPM dans la suite) sont déterminées en modifiant chaque entrée x_{ij} de PM de cette façon :

$$x_{ij}^n = \frac{x_{ij} - \mu_i}{\sigma_i} \quad (3.1)$$

où :

$$\mu_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (3.2)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \mu_i)^2} \quad (3.3)$$

Les équations (3.2) et (3.3) représentent la moyenne et l'écart type de la ligne i de MP, respectivement.

Dans notre cas NPM a été obtenue à l'aide de la fonction 'zscore' de Matlab appliquée à PM.

2) Détermination de la matrice de proximité

Les distances entre les différentes stations ont été calculées en se basant sur les données de NPM. Les distances obtenues sont les éléments de la matrice de proximité que nous désignerons par PMX dans la suite. Un élément PMX_{ij} entre les stations i et j de PMX est déterminé par (Dubes, R. & Jain, A., 1988; Kaufman & Rousseeuw, P., 1990) :

$$PMX_{ij} = \left(\sum_{k=1}^N |x_{ik}^n - x_{jk}^n|^r \right)^{1/r} \quad (3.4)$$

où r est un paramètre fixé ; N est le nombre de stations ; x_{ij}^n et x_{jk}^n sont les éléments de NPM.

Dans notre cas PMX a été obtenue à l'aide de la fonction 'pdist' de Matlab appliquée à NPM.

3) Identification des clusters

Un cluster est composé des stations les plus proches à un certain niveau de regroupement des stations. Au plus bas niveau de regroupement tous les clusters sont composés de 2 stations. À ce niveau si le nombre de stations est impair alors l'un des clusters sera formé d'une seule station. Si le nombre obtenu des clusters est supérieur à 2, une nouvelle matrice de distances entre les clusters sera calculée. En se basant sur cette nouvelle matrice de distances des clusters plus grands seront formés à partir de deux plus proches clusters. Ce processus de formation de clusters de plus en plus larges, c'est-à-dire composés de plus en plus d'un nombre important de stations continue jusqu'à ce que le nombre de clusters se réduit à 2. L'identification des clusters est obtenue grâce à la fonction 'linkage' de Matlab appliqué à la matrice des distances. Le résultat de la fonction 'linkage' est un arbre de cluster hiérarchique, Z .

4) Identification des zones

La fonction 'cluster' de Matlab a été appliqué à Z pour obtenir le nombre désiré de clusters. Nous avons retenu dans ce cas les 5 plus larges clusters pour obtenir les 5 zones désirées. Chaque station qui n'est pas dans les 5 zones est affectée dans l'une des 5 zones obtenues en fonction de l'intervalle des latitudes auquel la latitude de la station appartient. Les données météorologiques utilisées dans cette sous-section proviennent de 50 stations situées dans diverses régions climatiques du Québec. Les tableaux A I-1 et A I-2 donnent les noms de ces stations ainsi que leurs coordonnées géographiques correspondantes. Le tableau 3.1 indique les 5 zones obtenues avec leurs stations correspondantes lorsque. Il convient de noter que, par souci de simplicité, les stations sont identifiées par leur numéro, conformément à la première colonne des tableaux A I-1 et A I-2.

TABLEAU 3.1 Les zones identifiées et leurs stations

Zone	Stations
1	1 à 6
2	7 à 11
3	12 à 23
4	24 à 36
5	37 à 50

3.1.2 Analyse des variations annuelles de N dans les différentes zones

Les variations moyennes annuelles de N dans les cinq zones identifiées sont montrées à la figure 3.2.

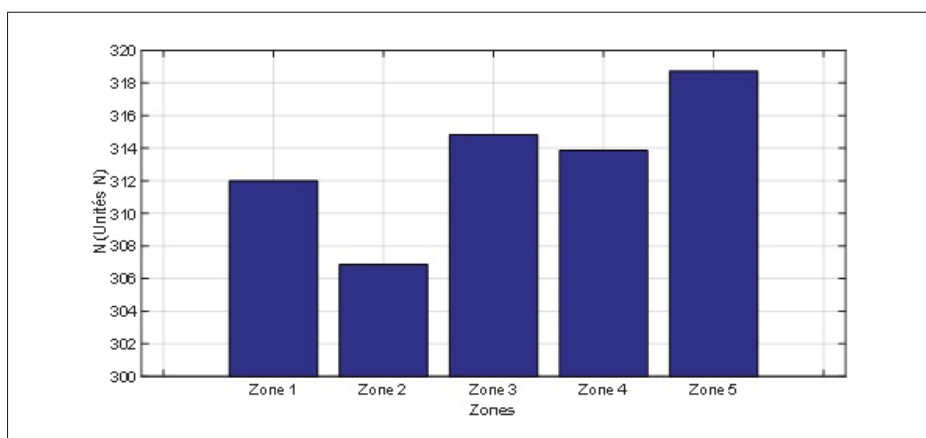


FIGURE 3.2 Variations moyennes annuelles de N par zone

D'après la figure 3.2, la valeur moyenne annuelle de N augmente du nord au sud pour les zones 1, 3 et 5. Cependant la zone 2 a une valeur de N inférieure à celle de la zone 1 qui est plus au nord. La même observation est valable pour la zone 4 dont la valeur de N est inférieure à celle de la zone 3. Cela est dû au fait que dans les zones 2 et 4 les stations ont des valeurs relativement élevées d'altitude. Si l'altitude est élevée la valeur de la pression atmosphérique diminuera, ce qui entraînera une diminution de N. Pour illustrer ce phénomène, puisque la pression P est le paramètre qui contribue plus à la valeur de N, la figure 3.3 présente les valeurs moyennes annuelles de P au sol. La figure 3.3 montre que les valeurs moyennes annuelles

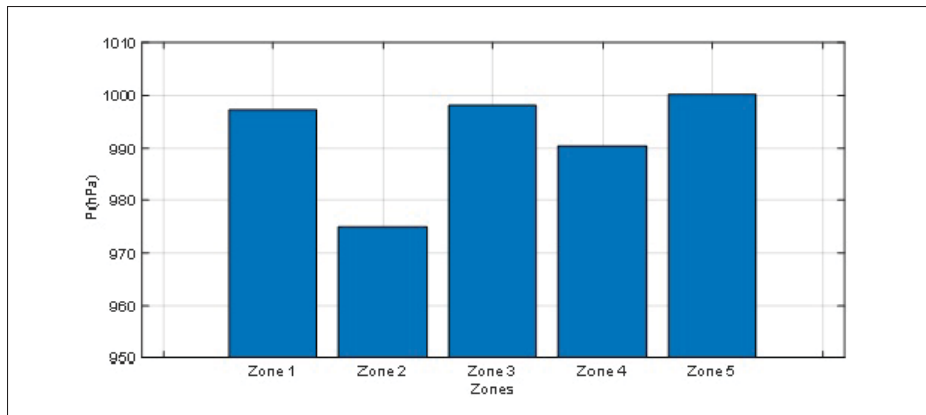


FIGURE 3.3 Variations moyennes annuelles de P par zone

de P pour les zones 2 et 4 sont faibles en comparaison des mêmes valeurs pour les zones 1, 3 et 5. Pour ces zones, les valeurs moyennes de P sont très proches. La comparaison des valeurs moyennes annuelles obtenues (c'est-à-dire les valeurs que nous avons adoptées ici) de N ramenées au niveau de la mer avec les valeurs correspondantes de l'UIT montre que les valeurs sont différentes mais similaires, comme le montre la Figure 3.4. Cette différence est due au fait que dans ce cas, un nombre important des données locales a été utilisé pour estimer la valeur de N. Notez que la réduction de la valeur de N au niveau de la mer est utilisée afin de supprimer la dépendance de N en fonction de l'élévation. Les résultats montrent également qu'il existe

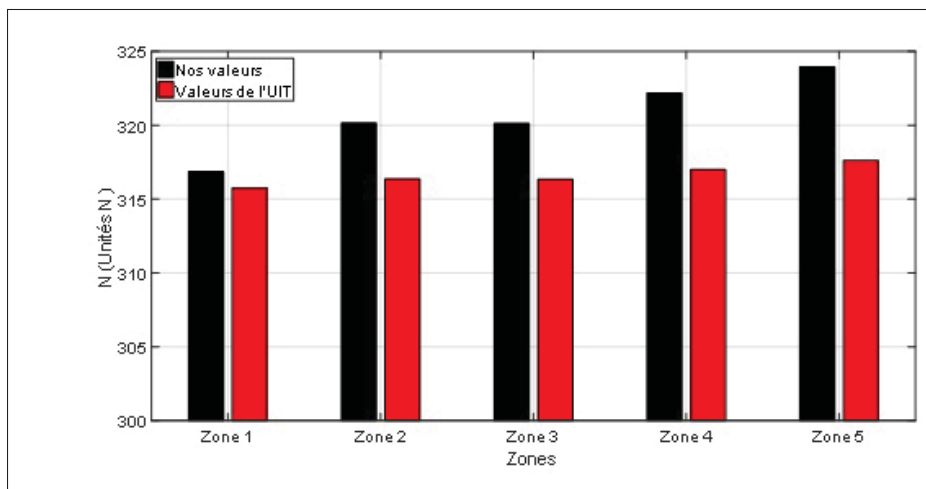


FIGURE 3.4 Variations moyennes annuelles de N ramenées au niveau de la mer

une faible dépendance des valeurs moyennes annuelles de la pression de vapeur d'eau et de la température avec l'altitude. Les figures 3.5 et 3.6 montrent que, même si les stations situées dans les zones identifiées ont des altitudes différentes, il existe une augmentation régulière de e et T de la zone 1 à la zone 5. Ainsi, les valeurs moyennes annuelles de e et T dépendent plus de la latitude que de l'altitude.

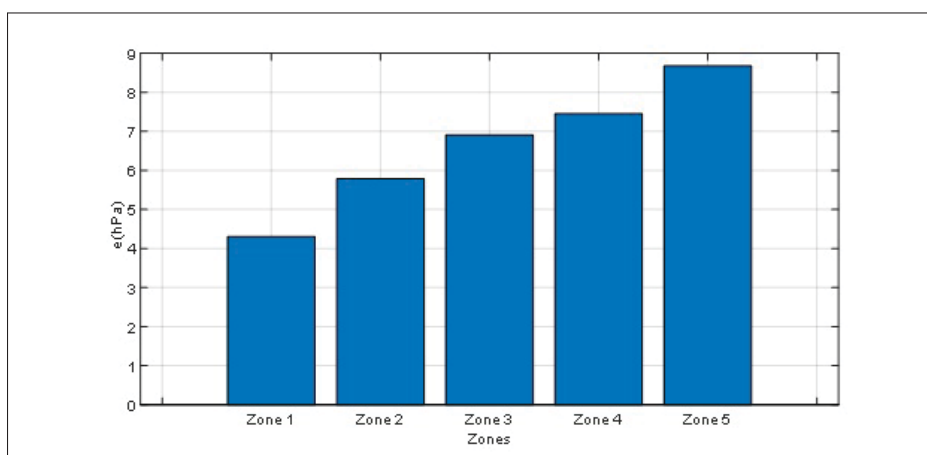


FIGURE 3.5 Valeur moyenne annuelle de e par zone

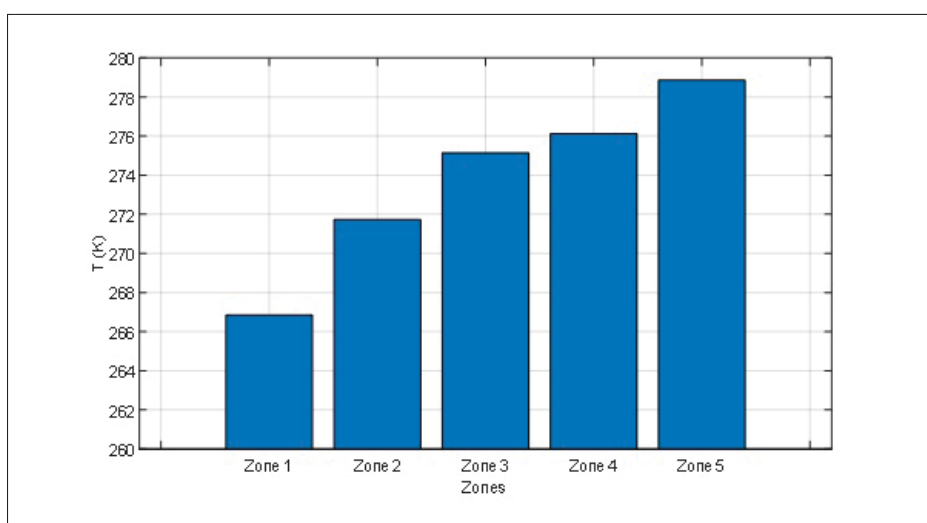


FIGURE 3.6 Valeur moyenne annuelle de T par zone

3.1.3 Analyse des variations mensuelles de N dans les différentes zones

Dans cette sous-section, les variations moyennes mensuelles de N dans différentes zones seront analysées. Dans chaque zone, les variations mensuelles de N obtenues sur la base des données recueillies auprès de toutes ou de certaines stations, ainsi que la variation moyenne de N seront représentées. Les variations moyennes mensuelles de N estimées en se basant sur les données mesurées au niveau des stations situées dans la zone 1 sont montrées à la figure 3.7. La figure 3.7

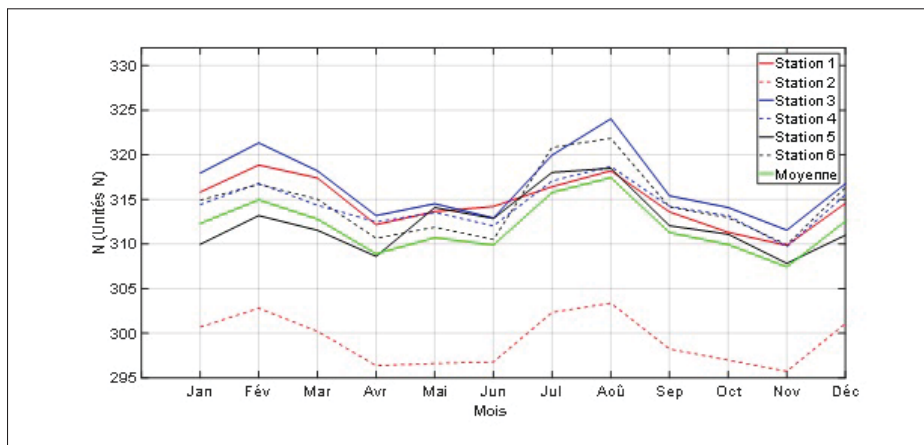


FIGURE 3.7 Variations moyennes mensuelles de N dans la zone 1

montre que les variations moyennes mensuelles de N pour différentes stations ont des valeurs différentes. En effet, les stations ont des altitudes différentes (tableau 1). Parmi ces stations, les valeurs de N pour la station 2 (parc Pingualuyt dans le tableau A.1) sont particulièrement basses, car l'altitude de cette station est très élevée (503.4 m) par rapport aux altitudes des autres stations. Cependant, nous pouvons noter que toutes les variations de N dans cette zone ont un comportement similaire. En général, les variations ont leurs valeurs maximale et minimale en août et en novembre respectivement.

La figure 3.8 montre les variations moyennes mensuelles de N pour les stations situées dans la zone 2. On peut observer sur cette figure que les valeurs de N (à l'exception de celles correspondant à la station 7) sont faibles pendant la plupart des mois, en particulier de janvier à juin par rapport aux valeurs de N dans la zone 1. Ces faibles valeurs sont dues au fait que

presque toutes les stations de la zone 2, à l'exception de la station 7, ont une altitude élevée, comme le montre le tableau A. Comme pour la zone 1 en général, les variations de N pour la zone 2 ont leurs valeurs maximale et minimale en août et novembre respectivement. Les

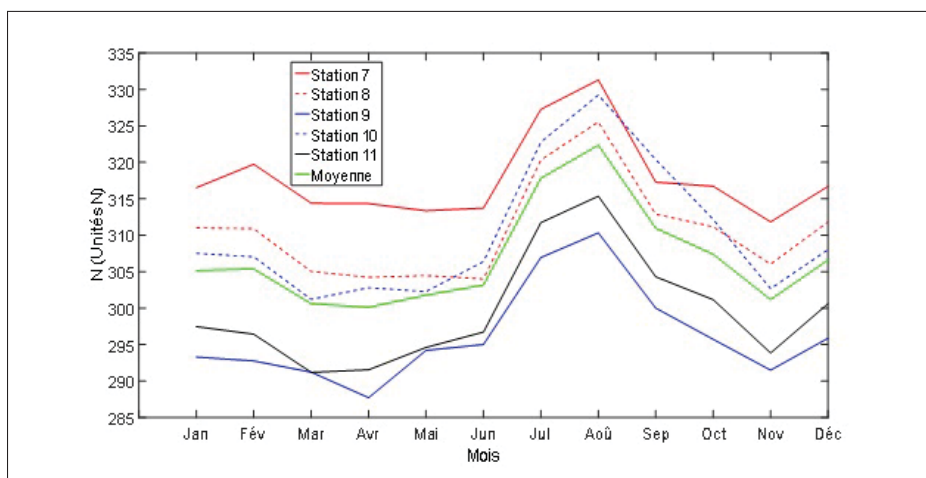


FIGURE 3.8 Variations moyennes mensuelles de N dans la zone 2

variations moyennes mensuelles de N pour plusieurs stations situées dans la zone 3 sont montrées à la figure 3.9. La différence importante entre les valeurs de N des stations 13 et 23 peut être expliquée en raison de la différence des altitudes de ces stations. L'altitude de la station 13 est de 498 m, alors que celle de la station 23 est seulement de 5 m. Dans cette zone, la plupart des variations ont leur valeur maximale en août et leur valeur minimale sur la période de février à avril. L'observation est la même pour les zones 4 et 5 où la plupart des variations ont leur valeur maximale en août et leur valeur minimale en mars.

3.2 Analyse de l'effet de la présence d'un cours d'eau sur la variation de N

Dans cette section les données qui seront utilisées pour l'analyse proviennent de 4 stations qui sont situées plus ou moins proche d'un cours d'eau. La figure 3.10 montre l'emplacement géographique de ces stations. Le tableau 3.2 donne les paramètres géographiques de ces stations. Pour les quatre stations, les variations moyennes journalières de N sont estimées à partir des données mesurées pendant les mois les plus secs et les plus humides de l'année 2013 (voir tableau 3.3). Les figures. 3.11, 3.12, 3.13 et 3.14 montrent les variations moyennes journalières

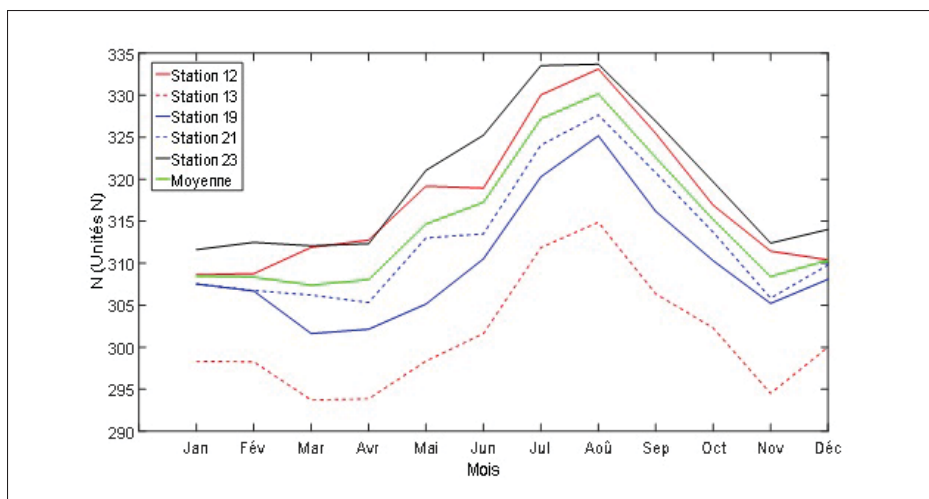


FIGURE 3.9 Variations moyennes mensuelles de N dans la zone 3

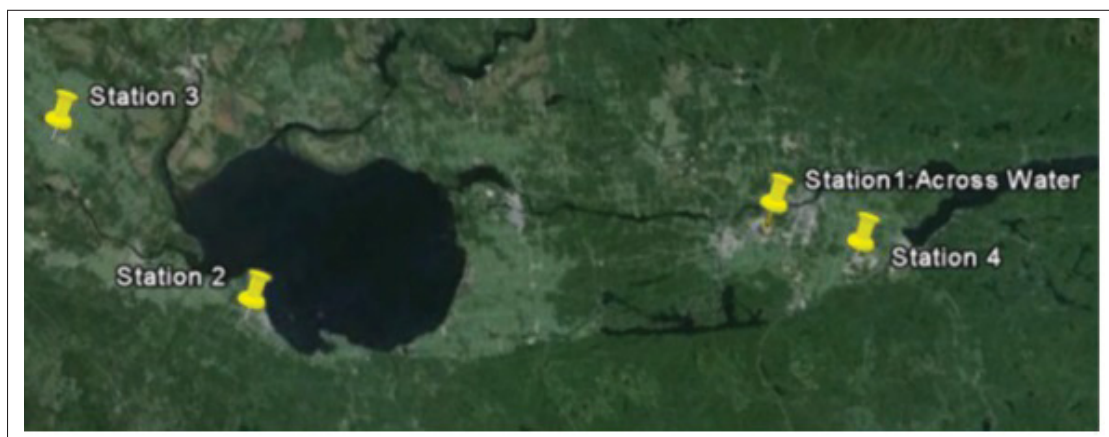


FIGURE 3.10 Localisation géographique des quatre stations analysées

TABLEAU 3.2 La position géographique des stations

Station	Latitude	Longitude	Altitude
1	48.42	-71.15	128
2	48.52	-72.27	178.60
3	48.84	-72.55	137.2
4	48.33	-71	159

TABLEAU 3.3 Les mois sec et humide de chaque station

Station	Les mois sec et humide de l'année 2013	
	Mois sec	Mois humide
1	Février	Août
2	Mars	Mai
3	Mars	Septembre
4	Février	Août

de N pour les mois sec et humide des stations 1, 2, 3 et 4 respectivement.

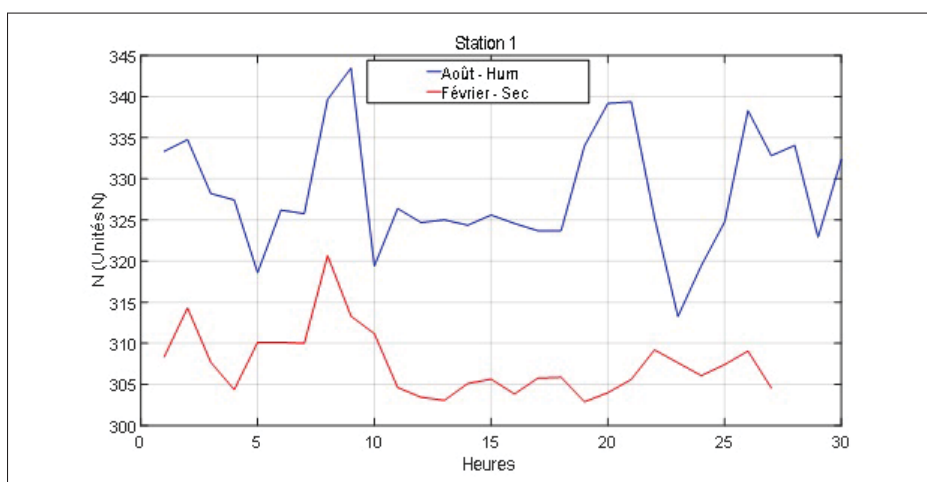


FIGURE 3.11 Variations moyennes journalières de N pour les mois sec et humide de la station 1

La station 1 est située dans un cours d'eau. Selon la figure 3.11 :

- 1) Pendant le mois humide la valeur de N est comprise entre 313.3 et 343.5 unités N. La valeur moyenne est de 328.4 unités N.
- 2) Pendant le mois sec la valeur de N est comprise entre de 302.9 et 320.7 unités N. La valeur moyenne est de 307.6 unités N.
- 3) La différence des valeurs moyennes de N des deux mois est de 20.8 unités N.

La station 2 est située à environ 4 km du cours d'eau. Selon la figure 3.12 :

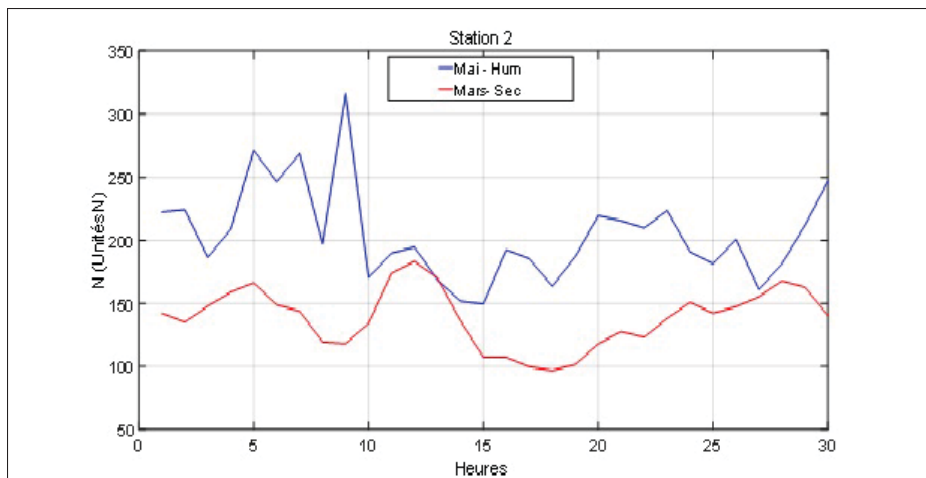


FIGURE 3.12 Variations moyennes journalières de N pour les mois sec et humide de la station 2

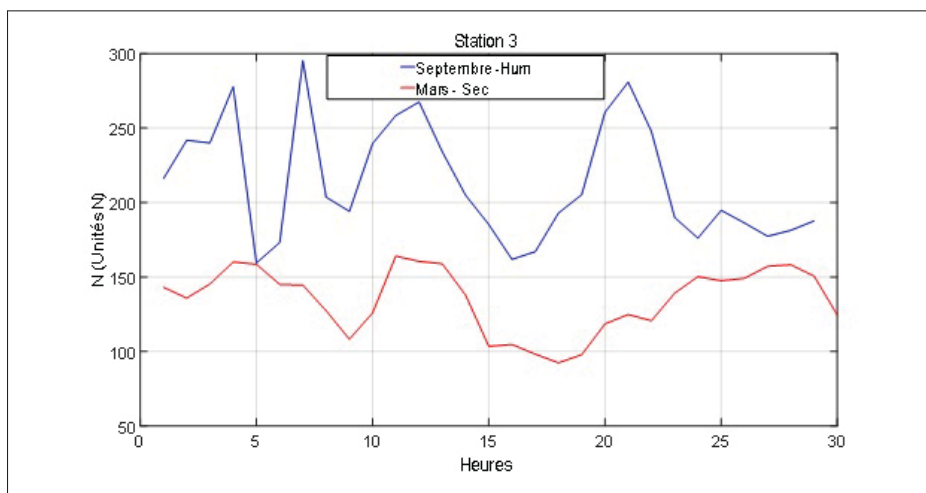


FIGURE 3.13 Variations moyennes journalières de N pour les mois sec et humide de la station 3

- 1) pendant le mois humide la valeur de N est comprise entre 149.6 et 316.2 unités N. La valeur moyenne est de 204.6 unités N.
- 2) pendant le mois sec la valeur de N est comprise entre de 96.75 et 183.4 unités N. La valeur moyenne est de 138.8 unités N.

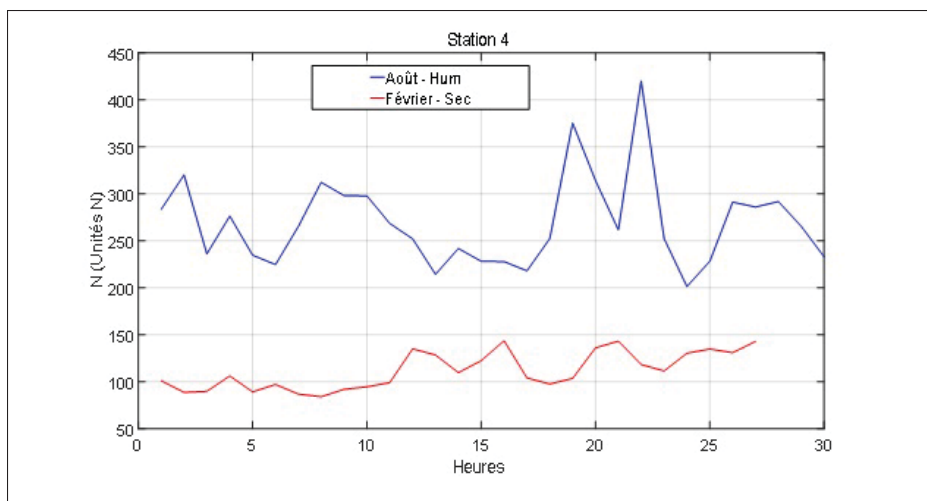


FIGURE 3.14 Variations moyennes journalières de N pour les mois sec et humide de la station 4

3) la différence des valeurs moyennes de N des deux mois est de 65.8 unités N.

la station 3 est située à environ 23 km du cours d'eau. Selon la figure 3.13 :

1) pendant le mois humide la valeur de N est comprise entre 159.3 et 295.4 unités N. La valeur moyenne est de 213.8 unités N.

2) pendant le mois sec la valeur de N est comprise entre de 92.34 et 134 unités N. La valeur moyenne est de 135.1 unités N.

3) la différence des valeurs moyennes de N des deux mois est de 78.7 unités N.

La station 4 est située à environ 62 km du cours d'eau. Selon la figure 3.14 :

1) pendant le mois humide la valeur de N est comprise entre 201.4 et 420.1 unités N. La valeur moyenne est de 269.2 unités N.

2) pendant le mois sec la valeur de N est comprise entre de 84.11 et 143.7 unités N. La valeur moyenne est de 112 unités N.

3) la différence des valeurs moyennes de N des deux mois est de 157.2 unités N.

La comparaison des courbes des variations de N des quatre stations montre que :

- 1) les variations de N ont une tendance similaire.
- 2) peu importe la station, les valeurs de N pendant le mois humide est toujours plus élevées par rapport aux valeurs observées pendant le mois sec. Ce qui prouve que la variation de l'humidité a une grande influence sur la valeur de N.
- 3) la différence des valeurs moyennes de N des mois humide et sec est de plus en plus grande au fur et à mesure qu'on s'éloigne d'un cours d'eau.

3.3 Analyse des variations de N, dN1 et K dans la région nord-est du Québec

Dans cette section les données utilisées dans l'étude proviennent de la station Kuujjuaq de l'année 2013. Cette station est située dans le nord-est du Québec dont la latitude, la longitude et l'altitude au-dessus du niveau de la mer sont 58.1°, -68.42° et 39.9° respectivement. Le site de l'environnement du Canada fournit les valeurs des paramètres météorologiques mesurés au sol. Ces données sont stockées en format CSV brut. Ici ces fichiers sont convertis en fichiers Excel pour un traitement ultérieur. Un exemple de ce fichier est présenté dans le tableau 3.4.

TABLEAU 3.4 Exemple des données d'un fichier

Date	Heure	Temp(°C)	Pt. de rosée (°C)	Hum. (%)	Pre. (kPa)
2013-08-01	00 :00	11,5	9,1	85	100,74
2013-08-01	01 :00	11,2	9,2	87	100,72
...	...	...	...	...	...
2013-08-31	01 :00	2,9	-0,6	78	100,11
2013-08-31	02 :00	1,8	0	88	100,12
...	...	...	...	...	...
2013-08-31	22 :00	5	0,3	72	100,86
2013-08-31	23 :00	4,3	0,2	77	100,89

3.3.1 Analyse de la variation de N

Dans cette sous-section, nous présentons d'abord les variations moyennes journalières de N, puis la fonction de la densité de probabilité (FDP) moyenne annuelle, saisonnière et mensuelle pour l'année 2013 (Bettouche *et al.*, 2020a).

La variation moyenne journalière de N est représentée à la figure 3.15. Sur cette figure sont représentées également les variations moyennes journalières de l'humidité et de la température du mois août 2013 afin de mettre en évidence l'influence de ces paramètres sur la valeur de N. Selon la figure 3.15 :

- les courbes de N et H ont une tendance similaire.
- les valeurs de N sont très élevées, élevées et basses pendant la matinée, la nuit et l'après-midi respectivement.
- la valeur maximale de N est observée à 7 h et sa valeur minimale à 14 h.
- la valeur de t varie de 8.19 à 15.42 °C. Les valeurs moyenne et médiane sont : 11.70 °C et 11.44 °C respectivement.
- la valeur de H varie de 60.52 à 89.45%. Les valeurs moyenne et médiane sont : 75.48% et 77.66% respectivement.
- la valeur de N varie de 317.5 à 342 unités N. Les valeurs moyenne et médiane sont : 321.47 unités N et 322.2 unités N respectivement.

La figure 3.16 montre la FDP en été et annuelle de N. Nous avons utilisé la divergence de Kullback-Leibler comme critère de sélection de la distribution saisonnière la mieux adaptée. Pour cela nous avons utilisé la procédure suivante :

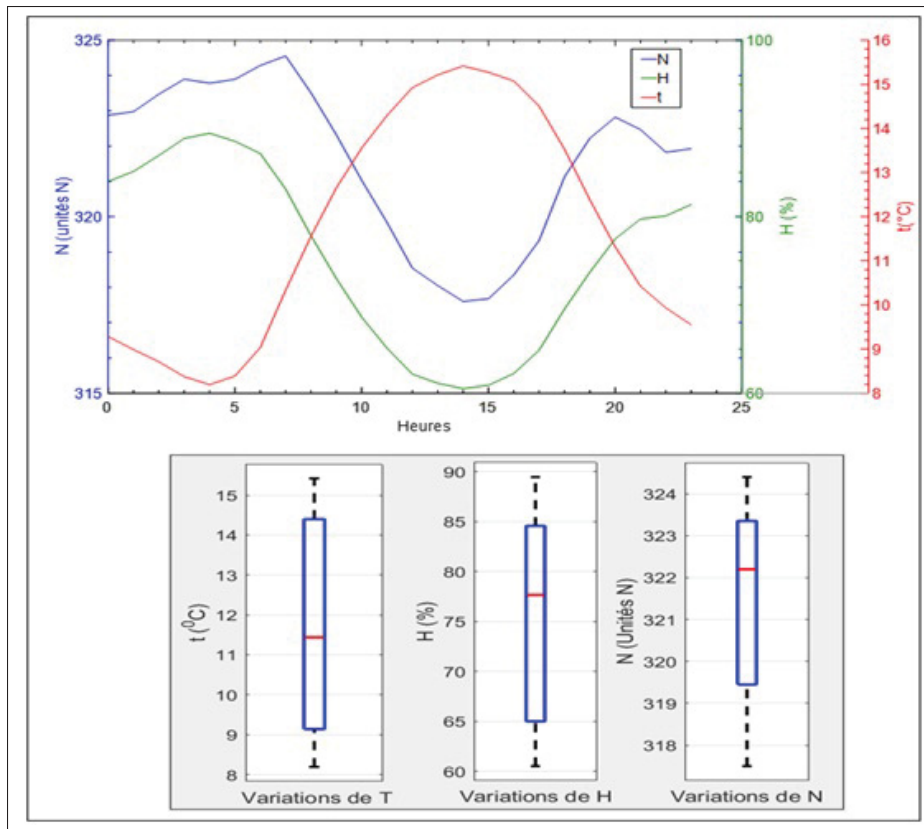


FIGURE 3.15 Variations moyennes journalières de N, H et T au sol en août 2013

- 1) À l'aide de la fonction 'mle' de MATLAB on a déterminé le maximum de vraisemblance de certaines distributions (Distribution Lognormale, Distribution Normale, Distribution Nakagami, . . .).
- 2) On calcule la divergence de Kullback-Leibler en utilisant la fonction 'kldiv' de MATLAB.
- 3) La distribution avec la plus petite valeur de la divergence de Kullback-Leibler a été sélectionnée. Dans notre cas, il s'agit de la distribution lognormale pour les FDP mensuelles, saisonnières et annuelles pour les données de la période analysée.

La FDP obtenue montre que N est une variable aléatoire log-normalement distribuée avec une valeur moyenne de N égale à 314.17 unités N. Cette valeur est proche de la valeur fournie par

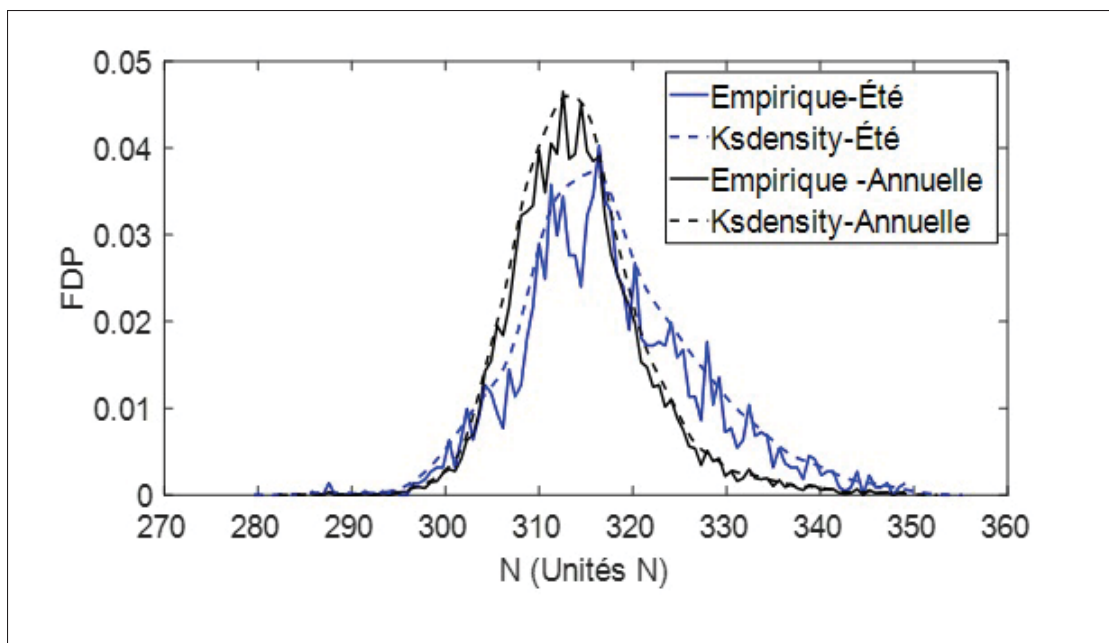


FIGURE 3.16 FDP en été et annuelle de N

l'UIT qui est de 315.6 unités N. Donc la valeur moyenne annuelle de N est en bon accord avec la valeur recommandée par l'UIT.

La figure 3.17 montre que la variation moyenne mensuelle de N de décembre 2012 à novembre 2013. La valeur la plus élevée de N est observée en août, tandis que la valeur la plus basse se trouve en novembre. La figure 3.18 montre la variation moyenne saisonnière de N. Les valeurs

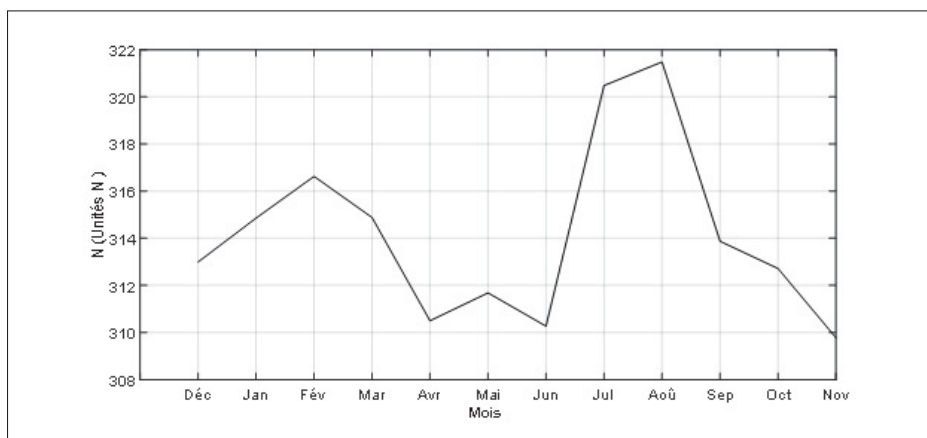


FIGURE 3.17 Variation moyenne mensuelle de N

les plus élevées de N se situent en été, en hiver, au printemps et en automne respectivement. Notons que les valeurs de N au printemps et en automne sont presque les mêmes. La FDP de N

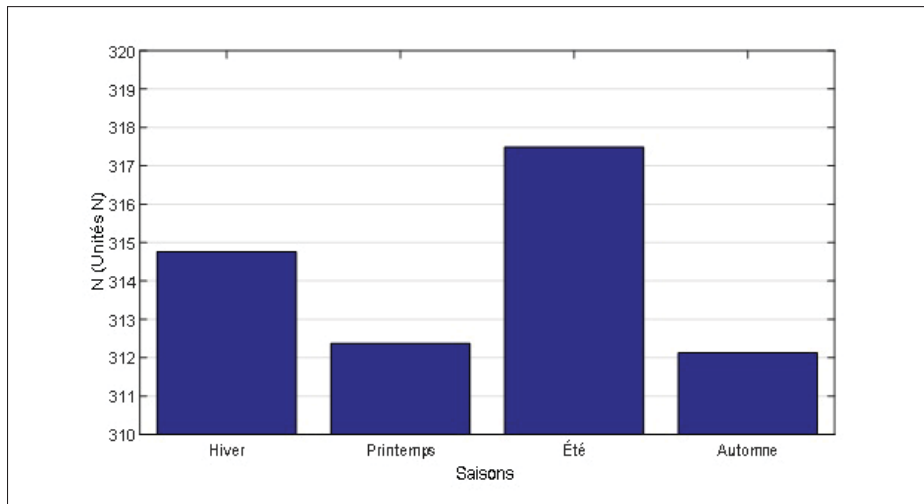


FIGURE 3.18 Variation moyenne saisonnière de N

pour certains mois est montrée à la figure 3.19. La figure 3.19 montre que les FDP moyennes

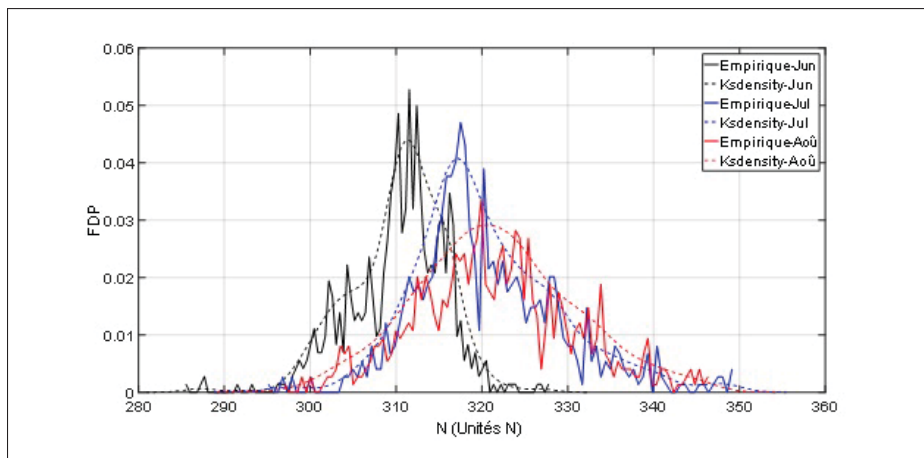


FIGURE 3.19 FDP moyennes mensuelles de N

mensuelles obtenues de N sont également des variables aléatoires log normalement distribuées.

Pour la station de Kuujjuaq, il a été observé que les valeurs annuelles, mensuelles et saisonnières de N suivent une distribution log-normale. Les valeurs élevées de N sont observées en été, particulièrement durant les mois de juillet (320.5 unités N) et août (321.5 unités N).

3.3.2 Analyse de la variation de dN1

Comme indiqué précédemment le gradient de réfractivité, dN1 est un indice important qui est utilisé dans la procédure de conception des liaisons hyperfréquences. Pour cette raison l'étude de la variation de cet indice est nécessaire.

1) Variations moyennes journalières de dN1

Les variations moyennes journalières de dN1 pour les mois de l'année 2013 (de décembre 2012 à novembre 2013) sont présentées à la figure 3.20. D'après les variations montrées à la figure

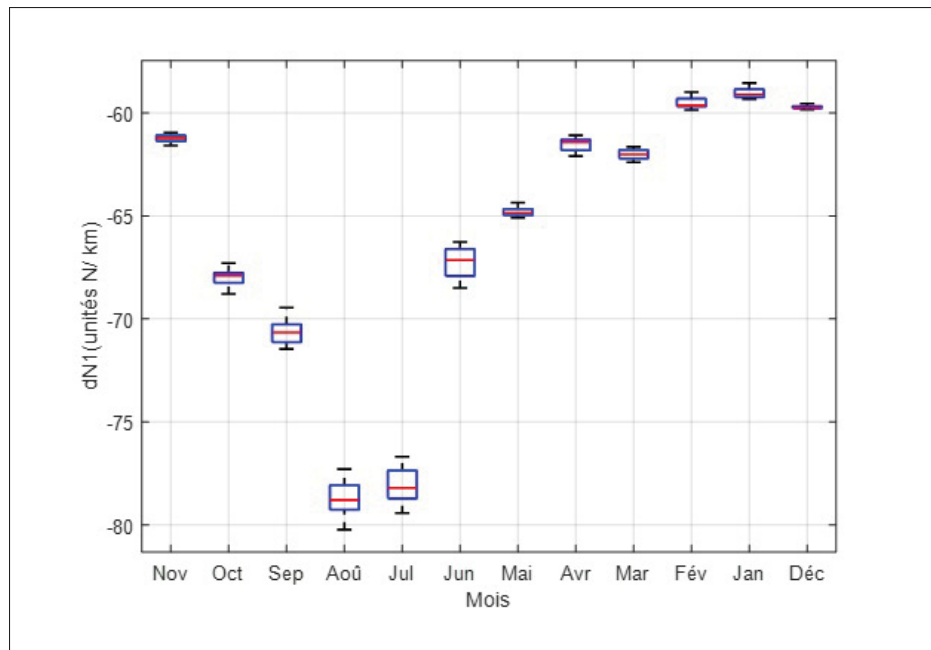


FIGURE 3.20 Variations moyennes journalières de dN1

3.20, il est clair que les valeurs les moins négatives et les plus négatives de dN1 se situent en hiver et en été respectivement. En 2013, le mois le plus défavorable est le mois d'août en raison des valeurs plus négatives de la moyenne journalière de dN1 trouvées dans ce mois. Pour chaque

mois, les variations moyennes journalières de dN1 se situent dans la plage où la réfraction standard est la norme.

2) Variations moyennes mensuelles de dN1

La figure 3.21 montre les variations moyennes mensuelles de dN1 en 2013 ainsi que les variations de e et T. La figure 3.21 montre que les valeurs de dN1 oscillent entre environ -79 et -59 unités

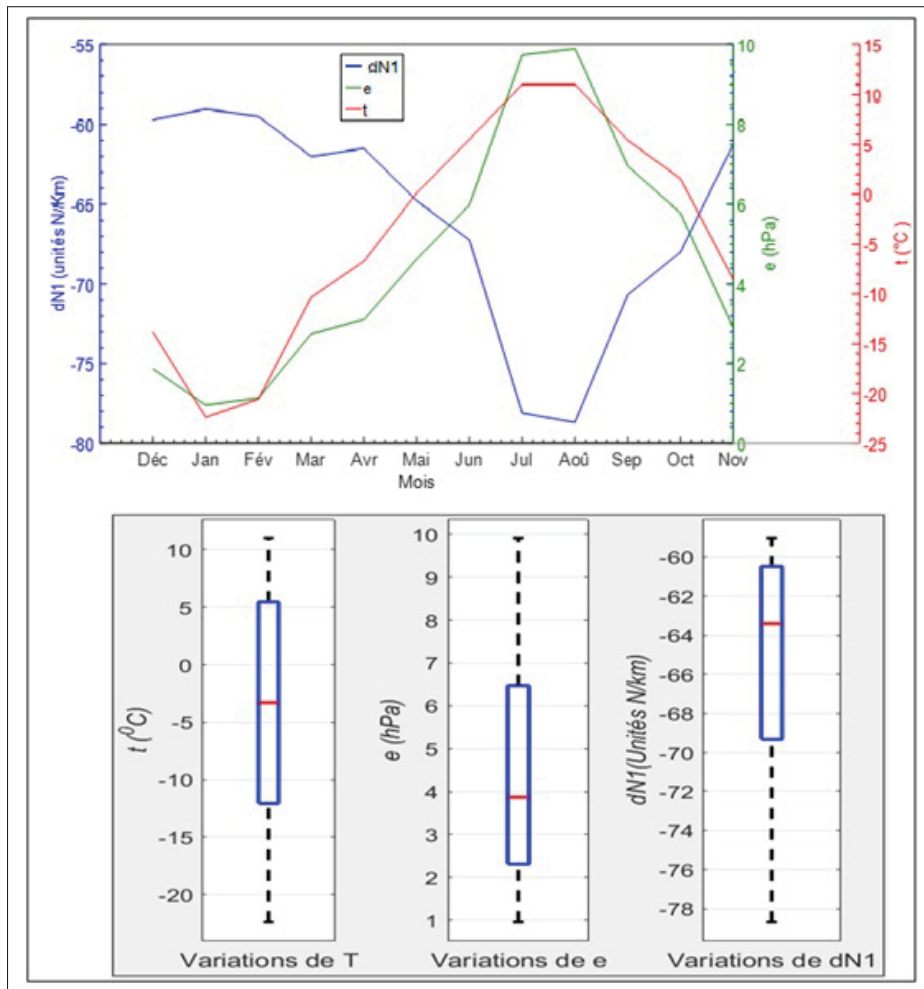


FIGURE 3.21 Variations moyennes mensuelles de dN1, e et t en 2013

N/ km. Les valeurs sont plus basses (plus négatives) pendant les mois d'été que pendant les mois d'hiver. Cela peut être attribué à la diminution de la teneur en vapeur et de la pression

et à l'augmentation de la température. L'intervalle de variation de dN1 correspond donc à une réfraction standard. La distribution cumulative de dN1 détermine la probabilité qu'une valeur donnée de dN1 soit inférieure à une valeur fixée. La figure 3.22 montre les distributions moyennes cumulatives mensuelles de dN1 de décembre 2012 à novembre 2013. La figure 3.22

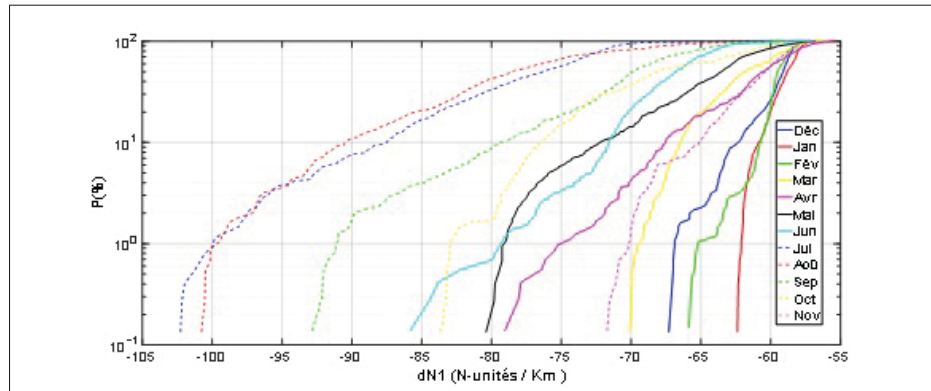


FIGURE 3.22 Variations moyennes mensuelles de la distribution cumulative de dN1

montre que toutes les courbes suivent une tendance similaire. En outre, presque pour tous les pourcentages de temps, les valeurs les plus négatives de dN1 se situent en août. On peut également remarquer que presque pour tous les pourcentages de temps, les valeurs les moins négatives de dN1 se situent en janvier. Les valeurs les plus négatives de dN1 sont dues à la présence des valeurs élevées de la température et de la pression de vapeur d'eau. Les valeurs moins négatives de dN1 sont au contraire dues à la présence des faibles valeurs de la température et de la pression de vapeur pendant la période correspondante de l'année. La figure 3.23 montre les variations moyennes mensuelles de dN1 pour différents pourcentages de temps à une altitude $h = 65$ m. Comme le montre la figure 3.23, toutes les courbes ont une tendance similaire. Les valeurs les plus négatives de dN1 pour 1

3) Variation saisonnière de dN1

La figure 3.24 montre les distributions moyennes cumulatives saisonnières et annuelles de dN1 de décembre 2012 à novembre 2013. Les paramètres dérivés des distributions annuelles sont donnés dans le Tableau 3.5. Les valeurs de dN1 qui ne sont pas dépassées pendant un certain

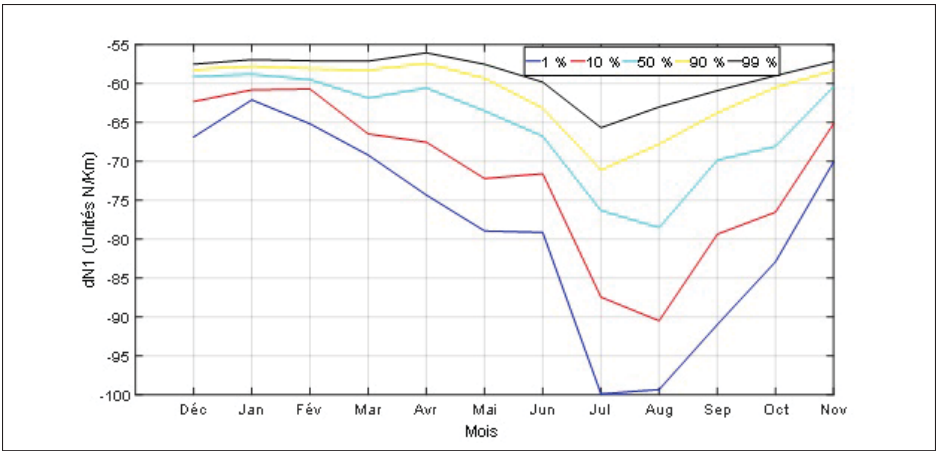


FIGURE 3.23 Variations moyennes mensuelles de dN1 pour différents pourcentages de temps

pourcentage de temps d’une année moyenne sont comparées aux valeurs fournies par l’UIT.

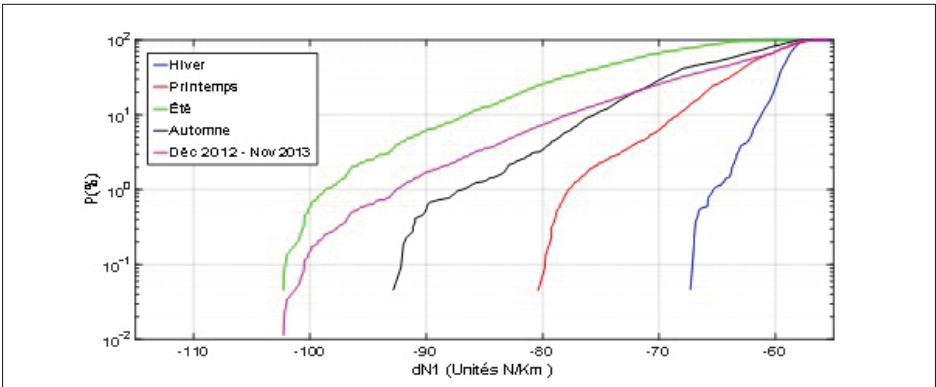


FIGURE 3.24 Distributions cumulatives moyennes saisonnières et annuelles de dN1

TABEAU 3.5 Comparaison des valeurs annuelles obtenues et celles de UIT

Percentage de temps,%	Valeurs estimées, Unités N/km	Valeurs de l’UIT,, Unités N/km
1	- 92.57	-250
10	-77.87	-112,6
50	-63.14	-41.8
90	-58.40	-23.8
99	-57.11	-3

Pour les résultats annuels, nous avons observé que pour les différents pourcentages de temps les valeurs de dN1 sont différentes des valeurs correspondantes fournies par l'UIT.

1) Pour les pourcentages de temps de 1% et 10%, la valeur du dN1 obtenue est supérieure à la valeur correspondante de l'UIT.

2) Pour les pourcentages de temps de 50%, 90% et 99% la valeur de dN1 obtenue est inférieure à la valeur correspondante de l'UIT.

La figure 3.24 montre que pour les courbes saisonnières, de plus en plus de valeurs négatives de dN1 apparaissent en hiver, au printemps, en automne et en été respectivement. Notons que les valeurs de IUT ont été déterminées à partir des données radiosondes datant des années 1955 à 1959. Dans notre cas les valeurs ont été estimées en se basant sur les données mesurées au sol pendant l'année 2013. Donc, à cause du changement climatique nos valeurs seront certainement différentes de celles de l'UIT. D'autre part, les données radiosondes sont plus précises.

3.3.3 Analyse de la variation de K

La figure 3.25 montre les variations moyennes journalières du facteur géo-climatique (K) ainsi que celles de l'humidité et de la température observées au sol en août 2013. La figure 3.25 montre que : La température varie de 7.5 °C à 14.73 °C. Les valeurs moyenne et médiane sont : 11.02 °C et 10.76 °C respectivement. L'humidité varie de 59.63% à 88.31%. Les valeurs moyenne et médiane sont : 74.46% et 76.60% respectivement. Le facteur géo-climatique varie de $0.106 \cdot 10^{-3}$ à $0.108 \cdot 10^{-3}$ Unité K. La valeur médiane est : $0.1069 \cdot 10^{-3}$ Unité K.

L'analyse montre que les valeurs de la température (t) augmentent progressivement de 04 h à 14 h et ensuite elles diminuent progressivement au cours de la journée. Pour l'humidité (H), les valeurs augmentent progressivement de 00 h à 04 h et de 14 h à 23 h. De 04 h à 14 h, ces valeurs diminuent progressivement. Pour le facteur géo-climatique K, il a été observé que les valeurs sont presque constantes de 00 h à 04 h et de 19 h à 21 h. On observe une augmentation

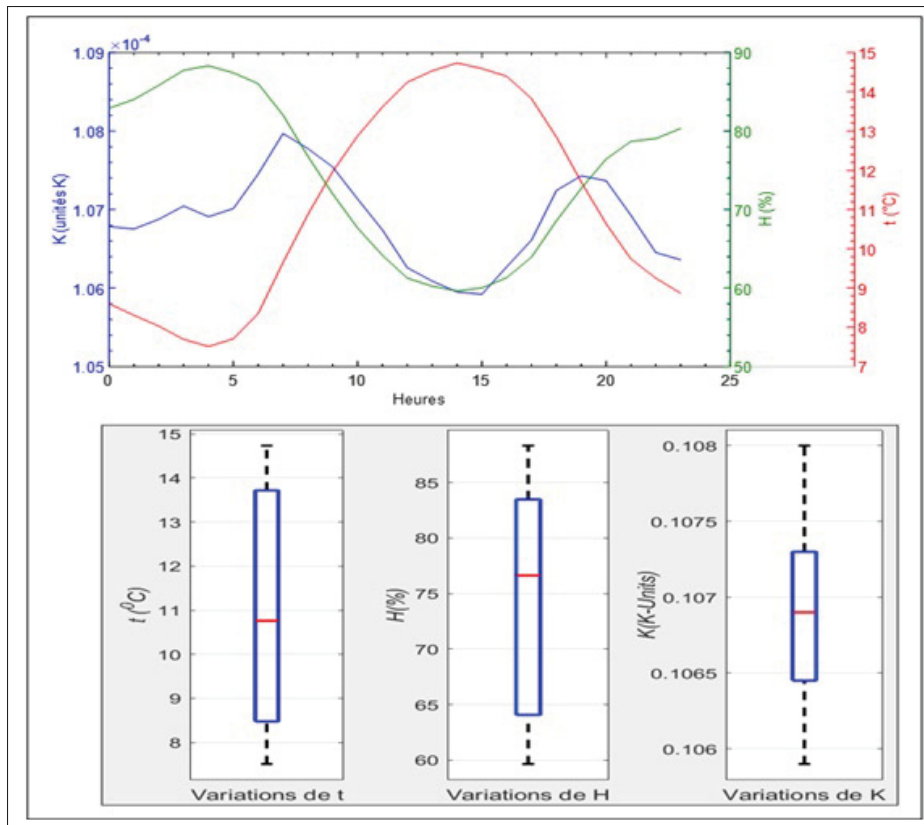


FIGURE 3.25 Variations moyennes journalières de K, H et t au sol

progressive des valeurs de K de 04 h à 07 h et de 15 h à 19 h. De 7 h à 15 h et de 21 h à 23 h les valeurs diminuent progressivement.

La figure 3.26 montre les variations moyennes journalières de K, dN1, and N à une altitude $h = 65$ m. La figure 3.26 montre que : Le coïndice de réfraction varie de 312.5 à 319.2 unités N. Les valeurs moyenne et médiane sont : 316.4 unités N et 317 unités N respectivement. Le gradient du coïndice de réfraction varie de -80.23 à -77.29 unités N/km. Les valeurs moyenne et médiane sont : -78.68 unités N/km et -78.79 unités N/km respectivement. Le facteur géo-climatique varie de $0.10592 \cdot 10^{-3}$ à $0.10797 \cdot 10^{-3}$ Unité K. La valeur médiane est : $0.10687 \cdot 10^{-3}$ Unité K. Selon la figure 3.26 de 04h à 07h et de 15h à 18h, les valeurs de K augmentent progressivement et les valeurs de dN1 diminuent progressivement. Ceci est dû aux valeurs élevées de H. À 07 h et 19 h, il y a plus de valeurs élevées du K et plus de valeurs négatives de dN1. En effet, pendant la

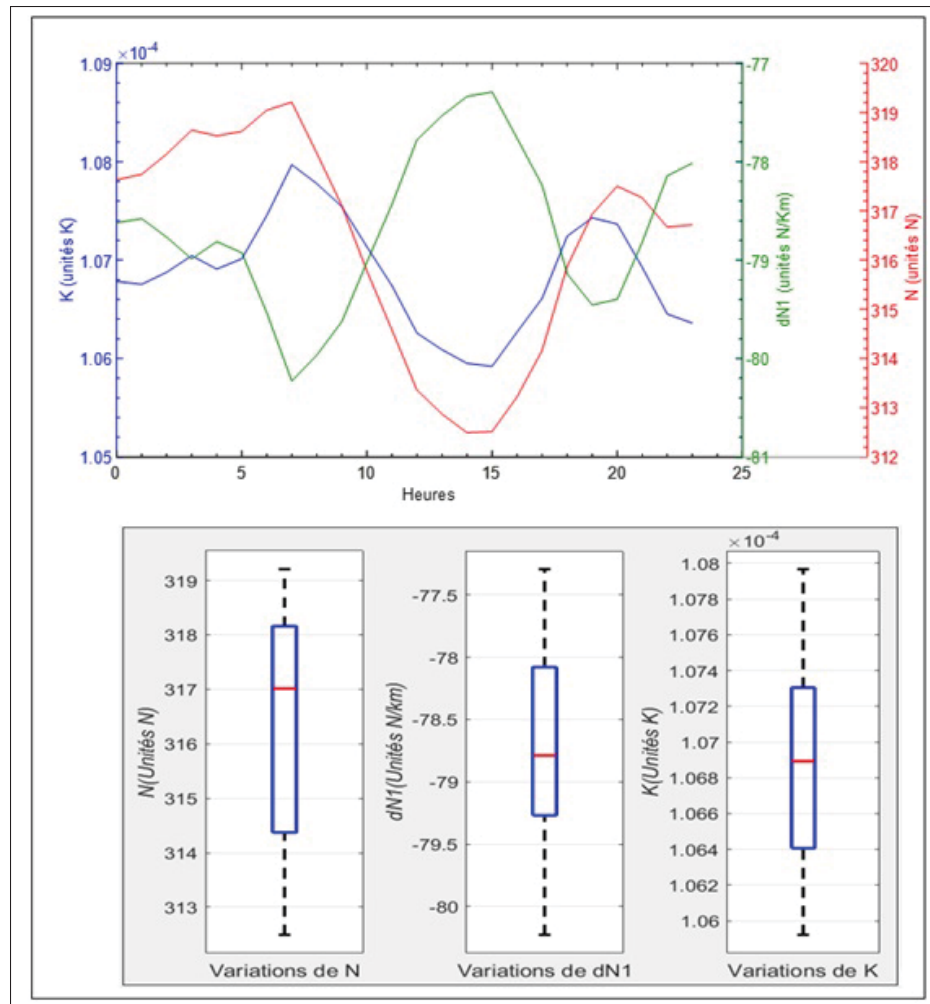


FIGURE 3.26 Variations moyennes journalières de K , $dN1$ et N à $h = 65$ m

même période, les valeurs de H sont élevées. À 15 h, on observe la plus basse valeur de K et la valeur la plus élevée de $dN1$. En effet, pendant la même période, les valeurs de H sont faibles. Toujours d'après la figure 3.26, on peut observer que de 07h à 15h et de 20h à 23h, les valeurs de K diminuent progressivement et les valeurs de $dN1$ augmentent progressivement. Ceci est dû à l'augmentation progressive des valeurs de H .

Pour K , on peut remarquer que les valeurs sont presque constantes de 00 h à 04 h et de 18 h à 20 h.

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE LA VARIATION À LONG-TERME DE N ET SON GRADIENT

Ce chapitre comporte 2 sections. La première section traite de l'étude de la variation de N et de son gradient dans le nord du Québec. Dans la deuxième section on donne une étude comparative de la variation de N dans le nord et le sud du Québec.

4.1 Étude de la variation de N et son gradient dans le nord du Québec

Dans cette première section les données météorologiques locales de la station de Kuujuaq pour une période de 35 ans (de 1979 à 2013) ont été utilisées pour estimer les valeurs de N ainsi que de son gradient, dN . On donne une analyse des variations moyennes mensuelles et annuelles de N et de dN . Les valeurs obtenues sont comparées aux valeurs correspondantes fournies par l'UIT. La tendance à long terme de N est également étudiée. Les résultats obtenus montrent que N et dN sont sujets à une évolution pouvant avoir une signification dans le contexte du changement climatique (CC). Les moyennes mensuelles de N ont un écart croissant par rapport aux valeurs de l'UIT-R depuis 1990. Les valeurs moyennes annuelles de dN diminuent progressivement au cours de la période étudiée. Les moyennes saisonnières de dN montrent une diminution dans le temps, surtout en été. Une telle tendance peut augmenter l'occurrence de la super-réfraction. Cependant, les recommandations de l'UIT-R actuellement disponibles pour la conception de liaisons hyperfréquences supposent un climat stationnaire ; il est donc nécessaire d'adopter une nouvelle approche de modélisation.

Le reste de cette section est organisée comme suit : Les sous-sections 4.1.1 et 4.1.2 donnent une analyse détaillée de la variation de N et dN respectivement. Des recommandations seront données sur la base de cette analyse. La section 4.1.3 donne les conclusions.

4.1.1 Analyse de la variation de N

Les données météorologiques utilisées dans ce chapitre proviennent tout comme celles de la section 3.3 du chapitre 3 de la station de Kuujjuaq. Cependant ici on considère les données d'une période de 35 ans (de 1979 à 2013) (Bettouche *et al.*, 2019). Pour cette analyse, l'année va du mois de décembre de l'année précédente au mois de novembre de l'année en cours. Ainsi, par exemple, l'année 2013 s'étend de décembre 2012 à novembre 2013.

La figure 4.1 montre les variations moyennes mensuelles de N, e et T estimées pendant la période analysée de 35 ans. Selon la figure 4.1 si la température et l'humidité ont un cycle annuel avec

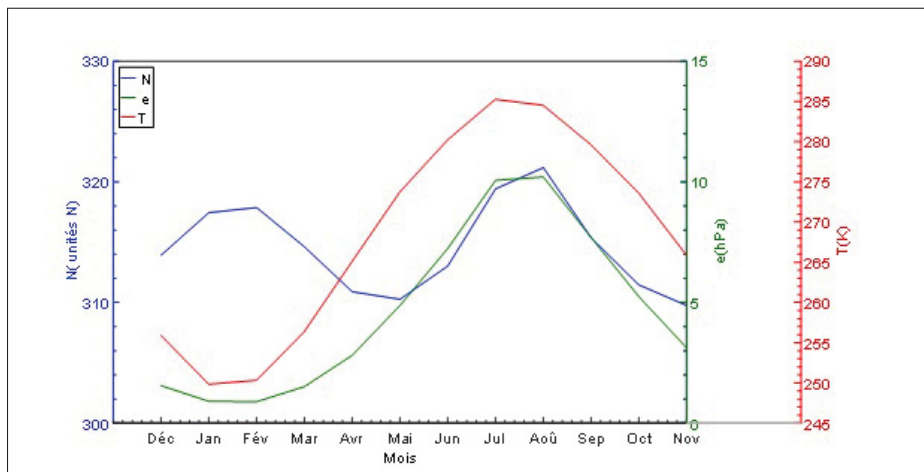


FIGURE 4.1 Variations mensuelles moyennes de N, T et e

un minimum en janvier-février et un maximum en juillet-août, N a deux cycles par an. Cela est dû au fait que, N a une forte composante sèche et une faible composante humide. La composante sèche, proportionnelle à P/T varie inversement avec la température. La composante humide variant avec e/T^2 est dominée par la variation d'humidité. Donc, elle est en phase avec le cycle de la température. Lorsque ces composants sont ajoutés, le pic de janvier à février reflète une composante sèche élevée, tandis que le pic légèrement plus élevé entre juillet et août reflète la composante humide.

La période de décembre à mai (voir Figure 4.2) représente le premier cycle de N. Dans ce cycle, nous avons obtenu une forte corrélation inverse ($= -0,944$) entre l'évolution de N et la variation de la température. La période de juin à novembre (voir la figure 4.3) représente le deuxième cycle de N. Dans ce cycle, nous avons obtenu une forte corrélation ($= 0,962$) entre l'évolution de N et la variation de la vapeur d'eau. La figure 4.4 montre les distributions cumulatives de N

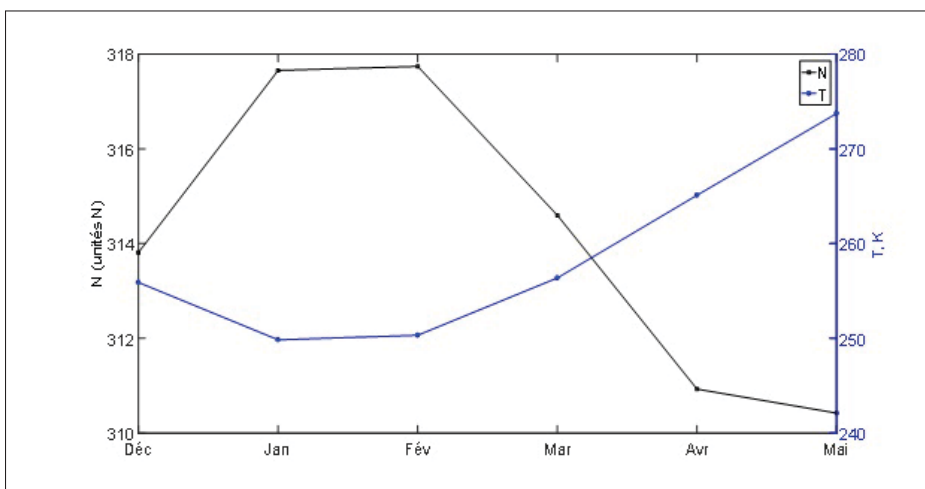


FIGURE 4.2 Variations moyennes mensuelles de N et T durant le 1er cycle

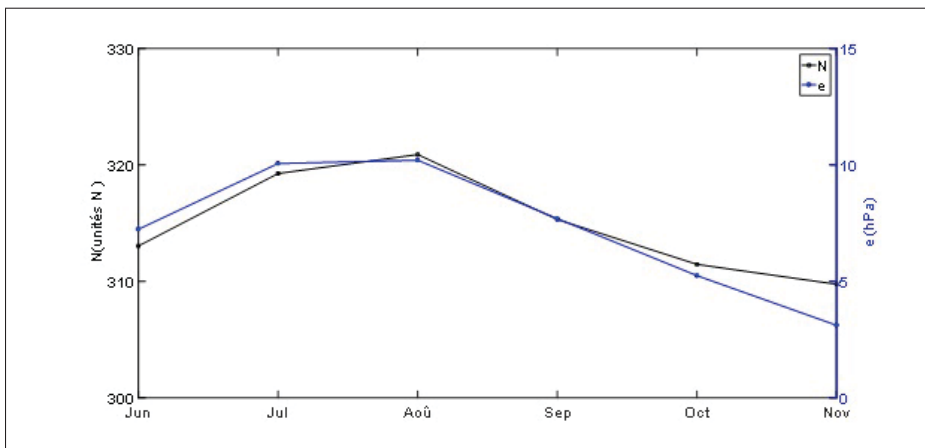


FIGURE 4.3 Variations moyennes mensuelles de N et e durant le 2e cycle

pour tous les mois. Pour un pourcentage de temps inférieur à 1%, les mois les plus défavorables

(Les mois avec des valeurs plus élevées de N) sont décembre, octobre, septembre et mars. Pour tous les pourcentages de temps restants, le mois le plus défavorable est août.

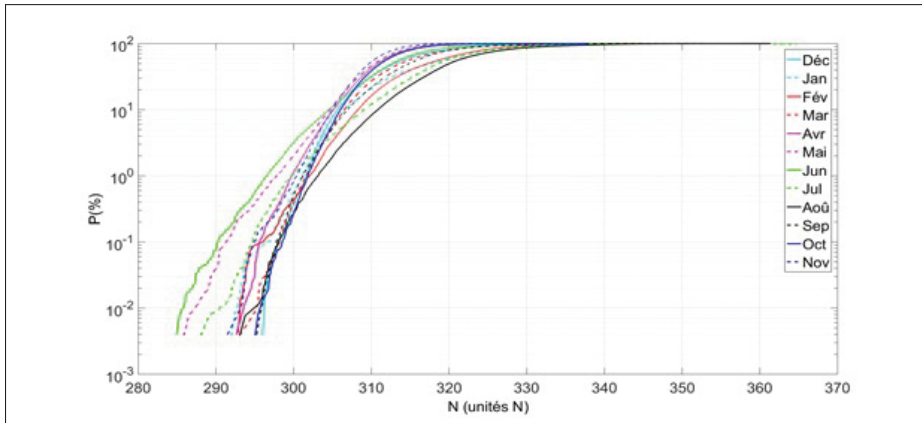


FIGURE 4.4 Distributions cumulatives moyennes mensuelles de N

Les figures 4.5 et 4.6 montrent les variations mensuelles de N et les tendances correspondantes pour les 12 mois de la période analysée. La figure 4.5 montre les valeurs moyennes mensuelles de N d'une année à l'autre de décembre 1978 à mai 2013. La diminution la plus forte de N est observée pendant le mois de décembre et la plus faible pendant le mois de mai. Durant ces mois, la probabilité de panne P_w sera plus faible d'une année à l'autre. La figure 4.6 montre que les valeurs moyennes mensuelles de N augmentent d'année en année entre juin 1978 et octobre 2013. La plus forte augmentation de N est observée pendant le mois d'août et la plus faible pendant le mois d'octobre. Pour le mois de novembre, on observe une lente diminution de N . Les valeurs obtenues du coefficient de corrélation (ρ) entre les valeurs moyennes mensuelles de N et de vapeur d'eau ainsi que de la température sont données dans le tableau 4.1. Les valeurs du coefficient de corrélation présentées dans le tableau 4.1 indiquent que l'évolution de N dépend à la fois de la vapeur d'eau (e) et de la température (T). Le tableau 4.1 montre également que :

1) les mois de décembre, janvier, février et mars ont une forte corrélation inverse avec la température.

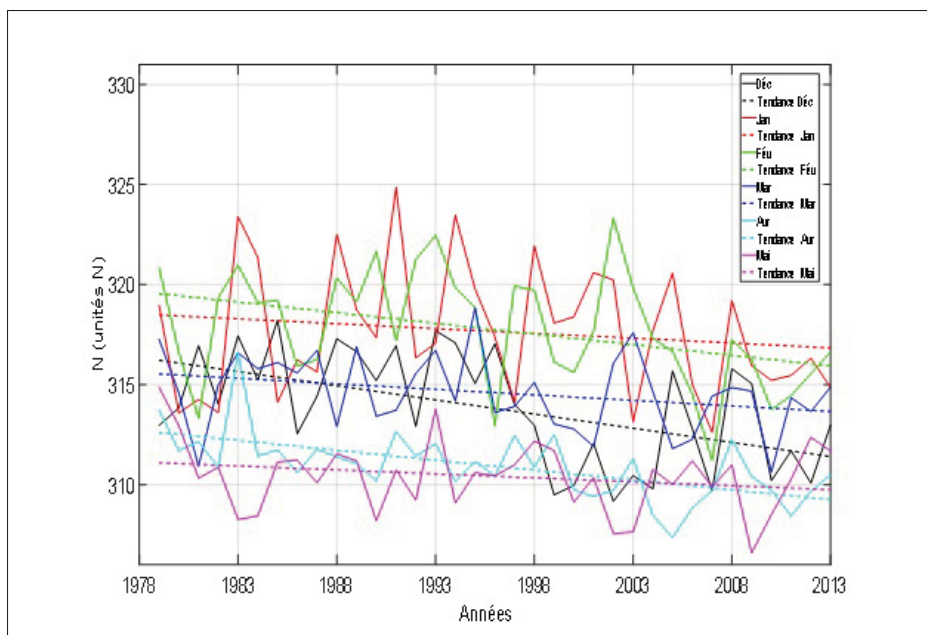


FIGURE 4.5 Variations moyennes mensuelles de N et leurs tendances (de décembre à mai)

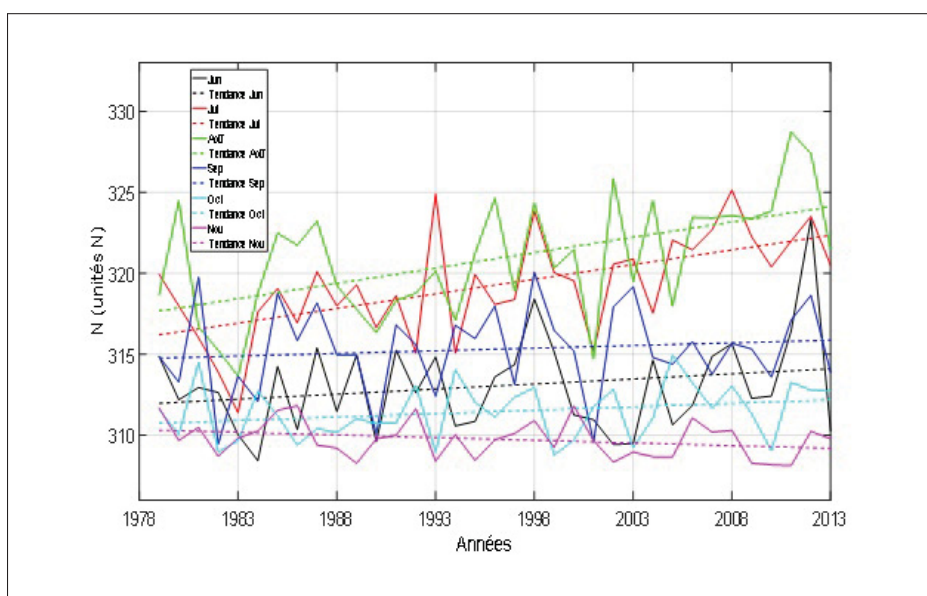


FIGURE 4.6 Variations moyennes mensuelles de N et leurs tendances (de juin à novembre)

TABLEAU 4.1 La corrélation entre les valeurs mensuelles de N et e et entre N et T

Mois	Coefficient de corrélation (ρ)	
	e	T
Décembre	-0.64	-0.81
Janvier	-0.75	-0.90
Février	-0.71	-0.84
Mars	-0.63	-0.75
Avril	-0.25	-0.49
Mai	0.54	0.16
Juin	0.77	0.41
Juillet	0.95	0.70
Août	0.95	0.59
Septembre	0.92	0.62
Octobre	0.77	0.52
Novembre	-0.05	-0.27

2) les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre ont une forte corrélation avec la pression de la vapeur d'eau.

3) le mois de mai est caractérisé par une corrélation moyenne avec la pression de la vapeur d'eau et une faible corrélation avec la température.

4) le mois de novembre est caractérisé par une très faible corrélation inverse avec la vapeur d'eau et une faible corrélation inverse avec la température.

Analysons l'évolution de N en détails pour les mois de février et août. L'analyse des données du tableau 4.1 montre clairement qu'il existe une corrélation inverse significative entre les valeurs de N et de la vapeur d'eau, ainsi que la température pour le mois de février. Cependant, la contribution de la température est plus importante car comme le montre la figure 4.2. Le mois de février se situe dans le premier cycle de l'évolution de N où sa valeur est principalement déterminée par la température.

Le tableau 4.1 montre aussi une forte corrélation entre N et la vapeur d'eau et une corrélation relativement faible avec la température pour le mois d'août. Cependant, la vapeur d'eau (humidité) a une contribution plus importante car, comme le montre la figure 4.3, le mois d'août se situe

dans le deuxième cycle de l'évolution de N où sa valeur est principalement déterminée par l'humidité.

Les valeurs moyennes de N pour les mois de février et août sont données dans le tableau 4.2.

Note : Dans le tableau 4.2 et tous les tableaux suivants, on utilise la variable x pour désigner le

TABLEAU 4.2 Les valeurs de N pour les mois de février et août

N, Unités N	Minimale	Maximale	Moyenne	UIT	Tendance linéaire
N_{Fev}	311.2	323.3	317.7	320	$-0.1064x + 316.3603$
N_{Aou}	313.7	328.7	320.9	320	$0.1894x + 317.4819$

numéro de l'année de la période analysée, c'est-à-dire $x = 1, 2, 3, \dots 35$.

La colonne UIT du tableau 4.2 indique les valeurs correspondantes fournies par l'UIT. Bien que la moyenne annuelle sur une période de 35 ans reste en bon accord avec les valeurs de l'UIT, cela dissimule le fait que les valeurs moyennes pour les mois les plus défavorables de février et août divergent de plus en plus d'une année à l'autre sur cette période.

Il est à noter que, si les valeurs moyennes sur la période de 35 ans sont proches de la valeur indiquée par l'UIT pour les mois de février et août, il existe une tendance linéaire différente pour les deux mois. Pour le mois de février la valeur de N diminue d'année en année. Pour le mois d'août une tendance inverse est observée. En effet, la variation de l'humidité est nettement plus importante en août qu'en février par rapport aux variations de la température. Les tendances de la température et de l'humidité pour les 2 mois sont données dans le tableau 4.3. Ces résultats

TABLEAU 4.3 Les tendances moyennes mensuelles pour T et e

Paramètre	Tendance linéaire	
	Février	Août
T, K	$0.1012 x + 248.0063$	$0.0537 x + 283.5524$
e, hPa	$0.0056 x + 0.7857$	$0.06 x + 9.1263$

confirment que le changement d'humidité est le paramètre qui influence le plus le changement de N. Les valeurs de N selon les données de l'UIT sont des valeurs constantes. En effet, les

recommandations de l'UIT ne considèrent pas l'évolution des paramètres climatiques (humidité, température et pression) dans le temps.

Dans cette étude, une analyse de la variation moyenne saisonnière est également fournie. La figure 4.7 présente les variations moyennes saisonnières de N et leurs tendances linéaires. Les

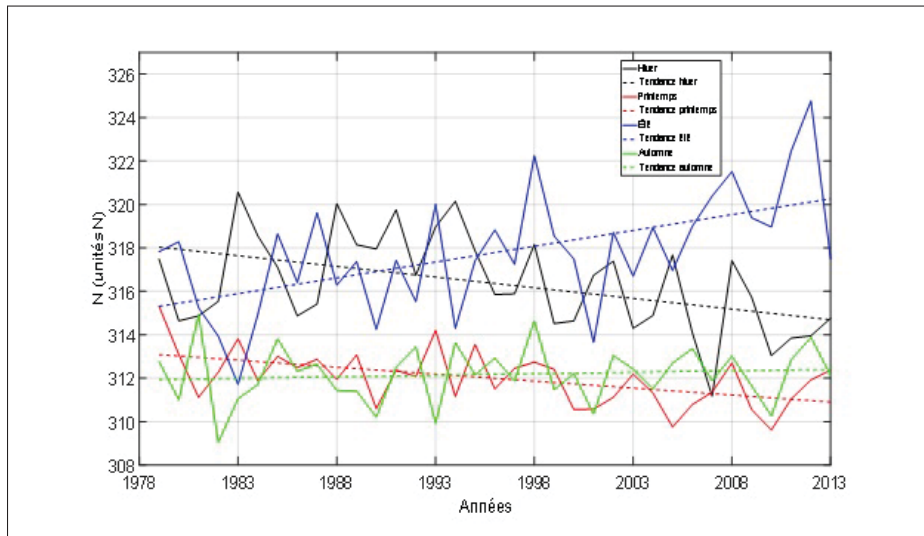


FIGURE 4.7 Variations moyennes saisonnières de N et leurs tendances linéaires

résultats obtenus montrent que, pour chaque année, les valeurs de N sont principalement plus faibles au printemps et à l'automne et plus élevées en hiver et en été. La figure 4.7 montre que, pour les saisons d'été et d'automne, l'évolution de la valeur moyenne de N augmente d'une année à l'autre. Cependant, cette augmentation est plus importante en été. Ceci est dû au taux d'humidité élevé en été d'une année à l'autre pendant la période analysée. Pour l'hiver et le printemps, l'évolution de la valeur moyenne de N diminue d'une année à l'autre. Cependant, cette diminution est plus importante en hiver. Pour la période de 35 ans, les tendances linéaires de N sont présentées au tableau 4.4 pour les quatre saisons. Pour établir un lien entre l'évolution saisonnière de N et les paramètres climatiques, le tableau 4.4 indique également les tendances linéaires de l'évolution de la température et de la pression de vapeur d'eau.

TABLEAU 4.4 Les tendances linéaires saisonnières de N, T et e

Saison	Tendance linéaire		
	N, Unités N	T, K	e, hPa
Hiver	$-0.0983x + 318.1304$	$0.1228x + 249.862$	$0.0103x + 0.9365$
Printemps	$-0.0643x + 313.1506$	$0.1074x + 263.142$	$0.0121x + 2.849$
Été	$0.1456x + 315.1616$	$0.086x + 281.8232$	$0.0566x + 8.167$
Automne	$0.0139x + 311.9241$	$0.080x + 271.5958$	$0.0228x + 4.9412$

Sur une période de 35 ans, la température et la pression de vapeur d'eau ont augmenté toutes les saisons. Toutefois, l'augmentation de la pression de vapeur d'eau est particulièrement importante en été, puis en automne, au printemps et en hiver. Les valeurs obtenues du coefficient de corrélation entre les valeurs saisonnières de N et de la vapeur d'eau ainsi que la température sont présentées dans le tableau 4.5. D'après le tableau 4.5 on observe une forte corrélation

TABLEAU 4.5 Corrélation entre les valeurs moyennes mensuelles de N et e et entre N et T

Saison	Coefficient de corrélation (ρ)	
	e	T
Hiver	-0.77	-0.89
Printemps	-0.00	-0.33
Été	0.92	0.62
Automne	0.71	0.31

entre N et la pression de vapeur d'eau ($= 0.92$) pour l'été et une corrélation moyenne entre N et la température ($= 0.71$) en automne. Il existe également une corrélation entre N et la température pendant ces saisons. Cependant, l'effet de cette corrélation est largement compensé par la corrélation entre N et la pression de vapeur d'eau. Pour cette raison, une augmentation de N est observée pendant ces saisons. Le tableau 4.5 montre qu'il existe une forte corrélation inverse entre N et la température en hiver ($= -0.89$) et une faible corrélation inverse ($= -0.33$) au printemps. Il existe également une corrélation inverse ($= -0.77$) entre la pression de vapeur d'eau et N pendant la saison hivernale. Cependant, l'effet de cette corrélation est largement compensé par la corrélation inverse entre N et la température. Pour cette raison, une diminution de N est observée pendant cette saison. Il n'y a pas de corrélation entre N et e au printemps.

4.1.2 Analyse de la variation de dN1

Dans cette étude, seules les données météorologiques locales mesurées au sol sont disponibles. Cependant, pour déterminer dN1, nous avons besoin de la valeur de N à une certaine hauteur (à 65 m dans ce cas). Pour cette raison, nous avons estimé les données météorologiques locales selon la méthodologie décrite dans le chapitre 1 de ce document. Notons que cette approche n'est pas exacte. Par exemple, certains phénomènes tels que l'inversion de température (augmentation de la température avec l'altitude) ne peuvent pas être pris en compte. Cependant, dans des conditions atmosphériques normales, les valeurs estimées de dN1 peuvent donner une bonne idée de l'évolution de dN1. Notre analyse sera limitée aux variations moyennes annuelle et mensuelle de dN1.

1) Variation moyenne annuelle de dN1

La variation moyenne annuelle de dN1 à une hauteur de 65 m et la tendance linéaire correspondante sur la période analysée de 35 ans sont données à la figure 4.8. La figure 4.8 montre

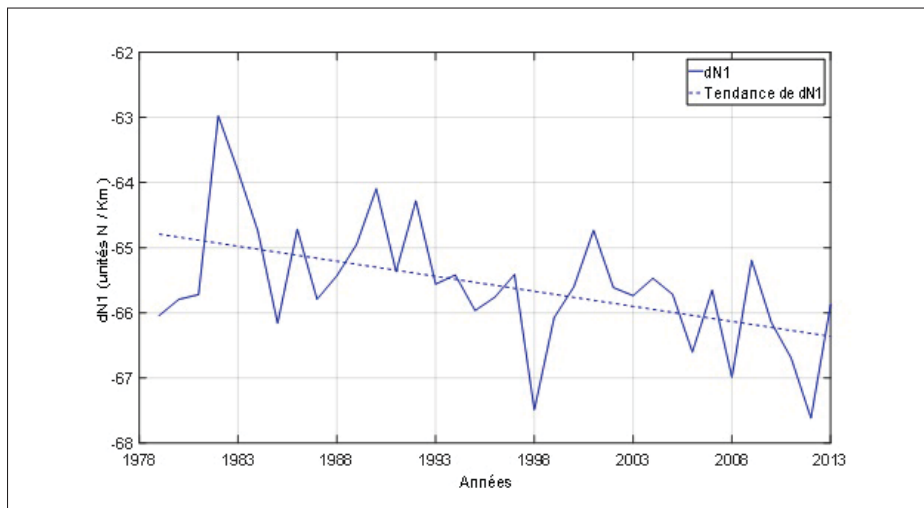


FIGURE 4.8 Variations moyennes annuelles de N par zone

que les années 1982, 1990, 1992, 2001 et 2009 ont les valeurs les plus élevées du dN1. De plus, on peut voir que l'année 1982 est caractérisée par la plus haute valeur de dN1. Les valeurs les plus basses de dN1 se situent en 2012 et 1998. La figure 4.8 montre que les valeurs moyennes

annuelles se situent dans l'intervalle de 67.62 à -62.97 Unités N/km. Ainsi, pour cette région la propagation est de type normal.

2) Variations moyennes mensuelles de dN1

La figure 4. 9 montre les variations moyennes mensuelles de dN1, e et T pendant la période analysée de 35 ans. Selon cette figure l'allure de la courbe de dN1 est inversement proportionnelle aux courbes de température et de la vapeur d'eau. De plus, pour toutes les années, on remarque que les valeurs les plus élevées se situent en hiver et les plus basses en été. La période de décembre à mars correspond à la période où les conditions climatiques sont très difficiles (très froid, précipitations sous forme de neige et tempête de neige). Au cours de cette période analysée la valeur moyenne de dN1 varie entre les limites qui correspondent à une propagation normale. La période d'avril à juin et de septembre à novembre est une période relativement agréable de l'année. En cette période, les précipitations sont sous forme de pluie. Pendant cette période aussi on observe une propagation normale. On peut également noter que la période de juillet à août est une période relativement agréable de l'année. Pendant cette période les précipitations sont sous forme de pluie.

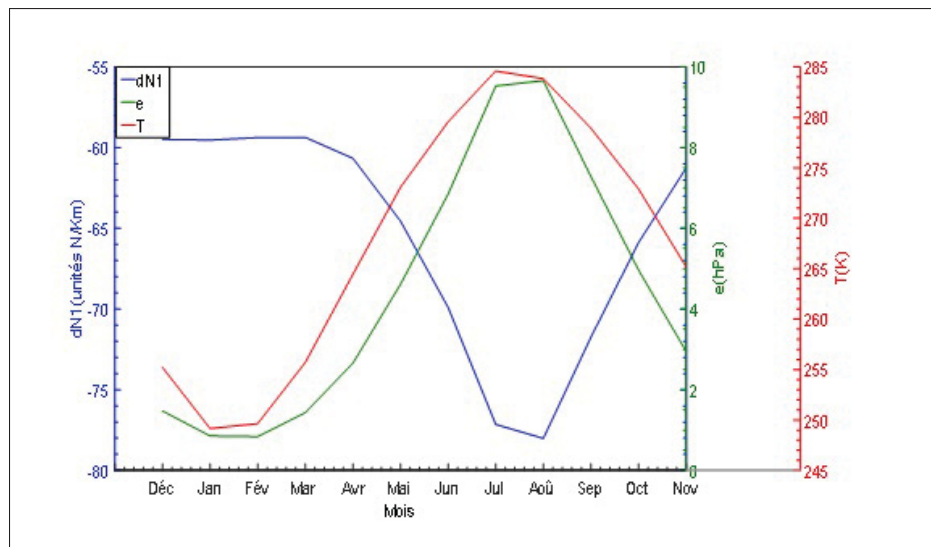


FIGURE 4.9 Variations moyennes mensuelles de dN1, e et T

4.2 Étude comparative de la variation de N dans le nord et le sud du Québec

Dans cette section les données météorologiques mesurées et archivées pendant 39 années (de 1981 à 2019) dans une station située dans la partie nord du Québec, Canada et une autre station située dans la partie sud ont été utilisées pour estimer N ainsi que ses composantes sèche (Nsec) et humide (Nhum). Les résultats de la comparaison des estimations obtenues ont montré que pour tous les mois de l'année, les valeurs de Nsec sont plus élevées dans la partie nord, tandis que les valeurs de Nhum sont plus élevées dans la partie sud. Pour cette raison pendant certains mois de l'année les valeurs de N sont plus élevées dans la partie nord et pendant les mois restants cette valeur est plus élevée dans la partie sud. En outre, dans les deux parties, août est le mois où se trouvent les valeurs les plus élevées de N. Pour ce mois-ci, la pente de la tendance de N au nord est plusieurs fois supérieure à celle du sud.

Les données météorologiques utilisées sont mesurées aux stations de Kuujjuak et de Montréal. La station Kuujjuak est située dans le nord-est du Québec à 58.1 ° de latitude et -68.42 ° de longitude, à une altitude de 39.9 m au-dessus du niveau de la mer. La station Montréal est située dans le sud-est du Québec à 45.7 ° de latitude et -73.74 ° de longitude, à une altitude de 32.1 m au-dessus du niveau de la mer. Le site de l'environnement Canada fournit les paramètres climatiques locaux (température, température de rosée, humidité, pression, etc.) stockés au format CSV brut (Canada, 2020). Ces fichiers sont convertis en fichiers Excel pour un traitement ultérieur.

4.2.1 Résultats et analyse de la variation de N

Dans cette sous-section, nous utiliserons les données horaires mesurées au niveau des stations Kuujjuak et Montréal, ainsi que la méthodologie décrite dans le chapitre 1 de ce document pour estimer N ainsi que ses composantes sèche et humide. Les résultats obtenus seront présentés et analysés.

Les stations considérées ont différentes altitudes : 39.9 m pour Kuujjuak et 32.1 m pour Montréal. Malgré cela, nous n'avons pas trouvé utile dans cette étude d'estimer les valeurs de N réduites

au niveau de la mer. En effet, les valeurs de la réfractivité au sol (N) et au niveau de la mer (N_0) sont liées par la relation suivante (Adediji, A., 2017) :

$$N = N_0 \times \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right) \quad (4.1)$$

Où h est l'altitude de la surface de la Terre par rapport au niveau de la mer et $h_0 = 9.5$ km. Étant donné que pour les stations considérées, les altitudes sont 39.9 m et 32.1 m, les valeurs de h seront respectivement 0.0399 km et 0.0321 km. Pour ces valeurs, en considérant l'équation (4.1), les valeurs de N et N_0 seront proches l'une de l'autre.

La figure 4.10 montre les variations moyennes mensuelles des composantes sèches pour les stations considérées (Bettouche *et al.*, 2020c). Selon la figure 4.10 les valeurs de N_{sec} à

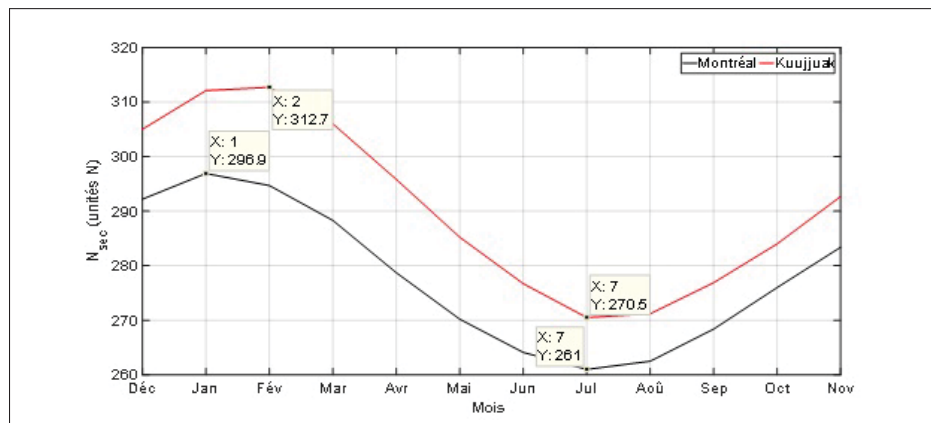


FIGURE 4.10 Variations moyennes mensuelles des composantes sèches

Kuujjuak pour tous les mois sont supérieures aux valeurs correspondantes à Montréal. Les valeurs maximale et minimale de N_{sec} sont indiquées dans la figure. Par exemple, à Kuujjuak, les valeurs maximale et minimale sont respectivement de 312.7 unités N (en février) et de 270.5 unités N (en juillet).

La figure 4.11 montre les variations moyennes mensuelles des composantes humides pour les deux stations. La figure 4.11 montre que, pour N_{hum} les valeurs à Montréal pour tous les mois

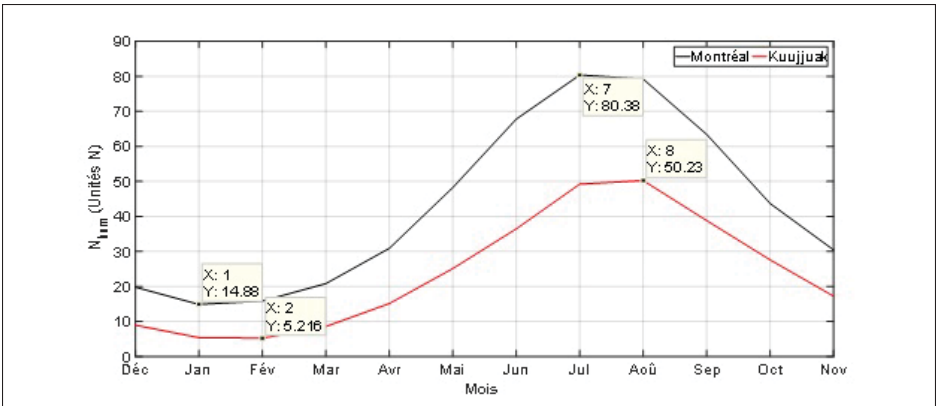


FIGURE 4.11 Variations moyennes mensuelles des composantes humides

sont supérieures aux valeurs correspondantes à Kuujjuak. Les valeurs maximale et minimale de N_{hum} sont indiquées dans la figure.

Le tableau 4.6 montre les valeurs de la différence entre les valeurs maximales et minimales de N_{sec} et N_{hum} à Montréal et à Kuujjuak. D’après le tableau 4.6, nous pouvons conclure qu’à

TABLEAU 4.6 Comparaison de N_{sec} et N_{hum} à Montréal et Kuujjuak

Station	Différence entre les valeurs maximale et minimale, Unités N	
	ΔN_{sec}	ΔN_{hum}
Montréal	35.9	65.5
Kuujjuak	42.2	45.014

Montréal, il existe une différence relativement significative entre ΔN_{sec} et ΔN_{hum} par rapport aux mêmes différences observées à Kuujjuak. Le tableau 4.7 montre la corrélation entre les valeurs moyennes mensuelles de N et celles de la température, de la vapeur d’eau ainsi que de la pression. La figure 4.12 montre les variations moyennes mensuelles de N pour les deux stations. L’analyse des données présentées dans le tableau 4.7 et des variations de N de la figure 4.12 montre que les mois qui ont un coefficient de corrélation élevé entre N et e indépendamment de la station sont les mois qui ont des valeurs élevées de N . Cela veut dire que l’humidité a une influence déterminante sur la valeur de N par rapport aux deux autres paramètres d’influence qui sont la température et la pression. D’autre part, selon les données présentées dans le tableau

TABLEAU 4.7 Corrélation entre les valeurs de N et celles de T, e et P

Mois	Coefficient de corrélation					
	Montréal			Kuujuaq		
	T(K)	e(hPa)	P(hPa)	T(K)	e(hPa)	P(hPa)
Déc	0.13	0.32	0.58	-0.81	-0.65	0.56
Jan	-0.46	-0.28	0.74	-0.92	-0.81	0.71
Fév	-0.07	0.17	0.72	-0.85	-0.70	0.44
Mar	0.06	0.53	0.50	-0.74	-0.65	0.26
Avr	0.14	0.84	0.01	-0.50	-0.27	0.62
Mai	0.45	0.93	0.14	0.17	0.53	0.22
Jui	0.44	0.97	-0.07	0.44	0.79	0.34
Jul	0.37	0.96	-0.05	0.71	0.96	-0.18
Aoû	0.51	0.95	-0.04	0.61	0.95	0.08
Sep	0.84	0.97	0.13	0.59	0.91	0.11
Oct	0.89	0.97	0.22	0.59	0.79	0.39
Nov	0.66	0.85	0.12	-0.23	-0.02	0.70

4.7 les mois de juillet et août ont une valeur du coefficient de corrélation élevé. Cette valeur est presque la même pour les deux stations. Mais selon la figure 4.12 les valeurs de N pour les mois de juillet et août de la station de Montréal sont largement supérieures aux valeurs correspondantes de la station de Kuujuaq. Cela indique que la région de Montréal est plus humide que la région de Kuujuaq. Selon la figure 4.12 les valeurs des variations de N à Kuujuaq

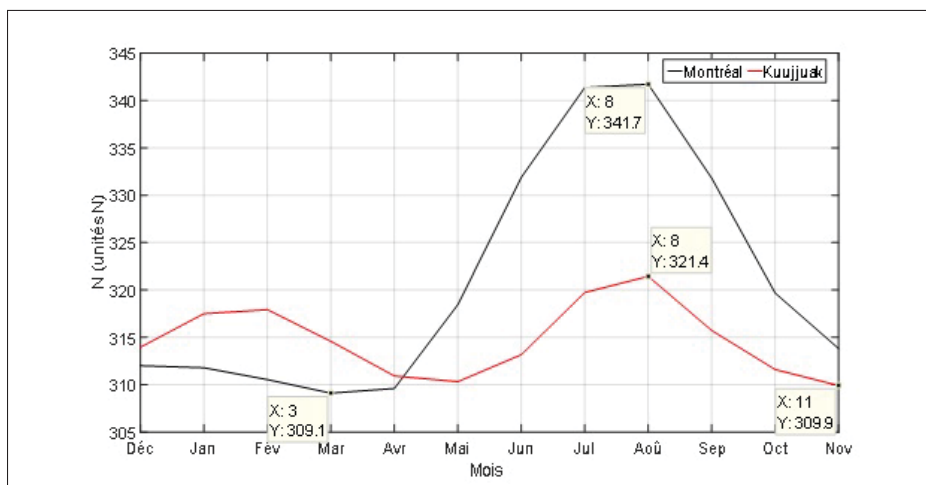


FIGURE 4.12 Variations moyennes mensuelles de N

sont supérieures à celles de Montréal pour les mois suivants : décembre, janvier, février, mars et avril. Pour le reste de l'année, les valeurs des variations de N à Montréal sont supérieures à celles de Kuujjuak. Ces variations sont dues aux variations de Nhum. Comme le montre la figure 4.11 pour les mois de mai à novembre, les valeurs de Nhum à Montréal sont beaucoup plus élevées que celles des mois de décembre à avril.

La figure 4.13 montre également que la contribution relative de Nhum dans N est plus élevée pour les mois de mai à novembre dans les deux stations. À Montréal, la contribution la plus élevée (23.55%) de Nhum dans N se situe en juillet, tandis que la contribution la plus faible (4.773%) se situe en janvier. À Kuujjuak, les contributions relatives maximale (15.63%) et minimale (1.641%) se situent respectivement en août et février. Cependant, pour chaque station, la contribution relative de Nhum dans N pour les mois de juillet et août est similaire. ‘

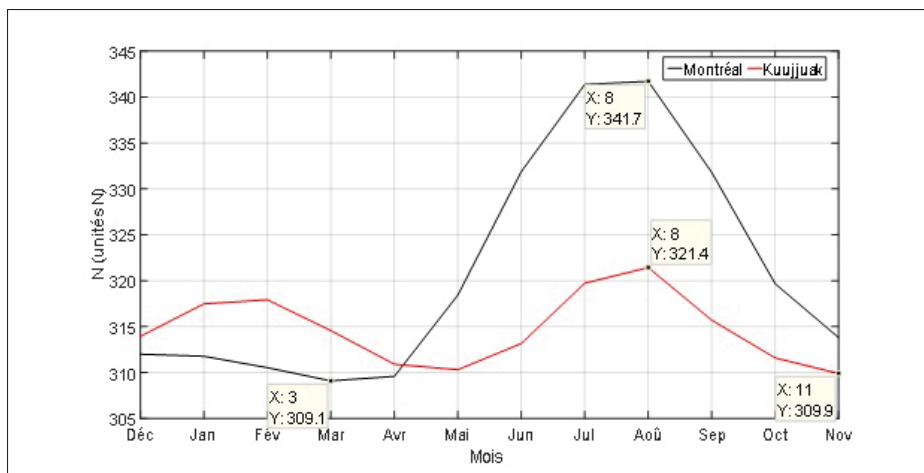


FIGURE 4.13 Contribution relative moyenne mensuelle de Nhum dans N

La figure 4.14 montre les variations moyennes annuelles de N et leurs tendances linéaires de 1981 à 2019 à Montréal et à Kuujjuak. Les équations des tendances linéaires illustrées à la figure 4.14 sont $0.015x + 320$ et $0.0048x + 310$ à Montréal et à Kuujjuak respectivement. Par conséquent, à partir de 1981, chaque année, N augmente de 0.015 à 0,0048 unité N à Montréal et

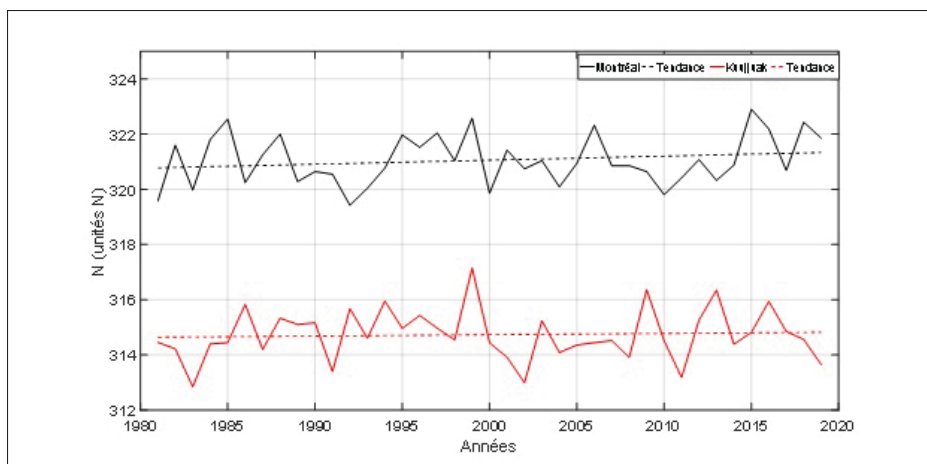


FIGURE 4.14 Variations moyennes annuelles de N et leurs tendances linéaires

à Kuujjuak, respectivement. Ainsi, l'augmentation de la tendance de N à Montréal est nettement supérieure à celle de Kuujjuak. ‘

La figure 4.15 montre les distributions cumulatives moyennes annuelles durant la période analysée pour les deux stations. Pour chaque station, nous avons également sélectionné les mois

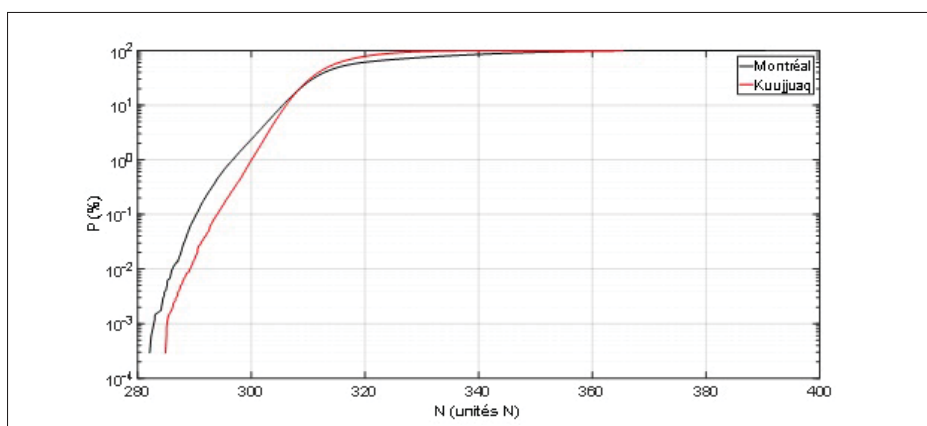


FIGURE 4.15 Distributions cumulatives moyennes annuelles de N

avec la valeur maximale et minimale de N. À Montréal, ces mois sont respectivement août et mars et à Kuujjuak - août et novembre (voir la figure 4.12).

La figure 4.16 montre les variations correspondantes de N et leurs tendances pendant la période analysée. Le tableau 4.8 présente les équations des tendances linéaires illustrées à la figure 4.16.

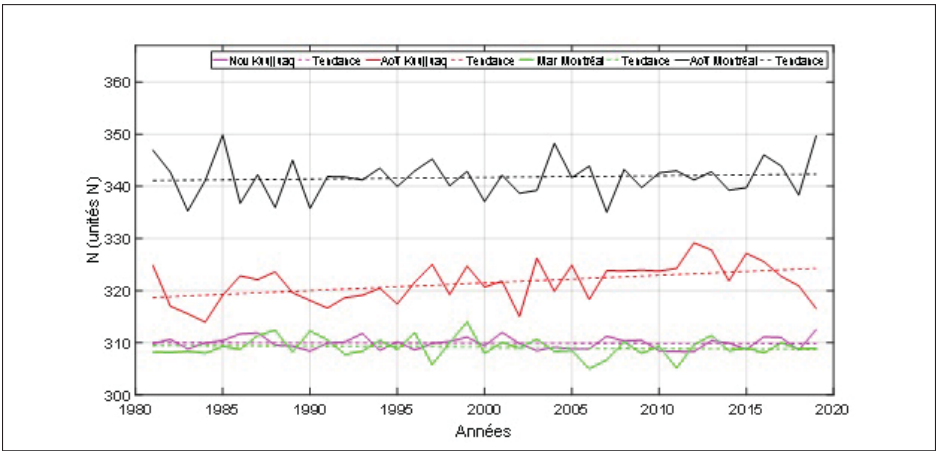


FIGURE 4.16 Variations de N et leurs tendances pour les mois sélectionnés

Selon le tableau 4.8, on peut conclure que dans le nord du Québec, l’augmentation de N est

TABLEAU 4.8 Équations des tendances linéaires pour les mois sélectionnés

Station	Équations des tendances linéaires	
	Mois avec la valeur minimale de N	Mois avec la valeur maximale de N
Kuujuuaq	$-0.0062x+310$	$0.15x+320$
Montréal	$-0.021x+310$	$0.032x+340$

relativement élevée (0.15 unité N/an) pour le mois le plus défavorable par rapport au sud, où l’augmentation n’est que de 0.032 unité N/an.

4.2.2 Prévision des valeurs de N

Étant donné que la station Kuujuuaq a la pente la plus élevée de la variation de N dans cette sous-section, nous allons utiliser une technique de prévision, appelée lissage direct (Direct smoothing en anglais) (Douglas,C., Lynwood,A. & John, 1990) afin d’estimer les valeurs futures de N. Le principal avantage de cette technique est qu’elle est efficace en termes de calcul. Selon cette technique de prévision, les nouveaux paramètres du modèle sont obtenus à partir des

paramètres précédents en ajoutant l'erreur de prévision de la période actuelle pondérée avec un certain coefficient. La valeur de prévision de N à une certaine période T est déterminée par (Douglas *et al.*, 1990) :

$$N_f(T) = a_1(T) + a_2(T) \quad (4.2)$$

où $a_1(T)$ et $a_2(T)$ sont les paramètres du modèle déterminés pour la période T :

$$\begin{cases} a_1(T) = a_1(T-1) + a_2(T-1) + (1 - \beta^2) \times e(T) \\ a_2(T) = a_2(T-1) + (1 - \beta)^2 \times e(T) \end{cases} \quad (4.3)$$

Dans l'équation (6.3), $e(T)$ est l'erreur de prévision (la différence entre la valeur observée $N(T)$ et la prévision de cette valeur $N_f(T)$) :

$$e(T) = N(T) - N_f(T) \quad (4.4)$$

Notons que pour estimer $N_f(T)$, les valeurs initiales de $a_1(T)$ et $a_2(T)$ sont nécessaires. Dans notre cas, nous considérons $a_1(T)$ et $a_2(T)$ comme l'intersection et la pente respectivement de la tendance linéaire obtenue des valeurs moyennes annuelles de N durant les 25 premières années de la période analysée. Nous avons obtenu : $a_1(0) = 318.828$ et $a_2(0) = 0.1263$.

La variable β dans l'équation (4.3) est la constante de lissage, dont la valeur se situe dans l'intervalle $0 < \beta < 1$. La méthode des moindres carrés basée sur l'utilisation des 14 dernières années restantes de la période analysée a été utilisée pour sélectionner la valeur optimale de β lorsque β est réglé dans l'intervalle de 0.1 à 0.9 avec un pas de 0.1. Étant donné que la période analysée est de 39 ans et que les 25 premières années ont été utilisées pour estimer les valeurs initiales des paramètres du modèle, il ne restera que les seules données des 14 dernières années. Ces données restantes sont utilisées pour estimer la prévision. Nous avons obtenu une valeur optimale de β égale à 0.6. Pour cette valeur de β , la figure 4.17 montre les valeurs observées et les prévisions obtenues en utilisant la procédure décrite ci-dessus. À partir de la figure 4.17, nous pouvons conclure que les prévisions sont relativement éloignées des valeurs observées pour les années où la valeur observée est très différente de la valeur qui correspond à l'année

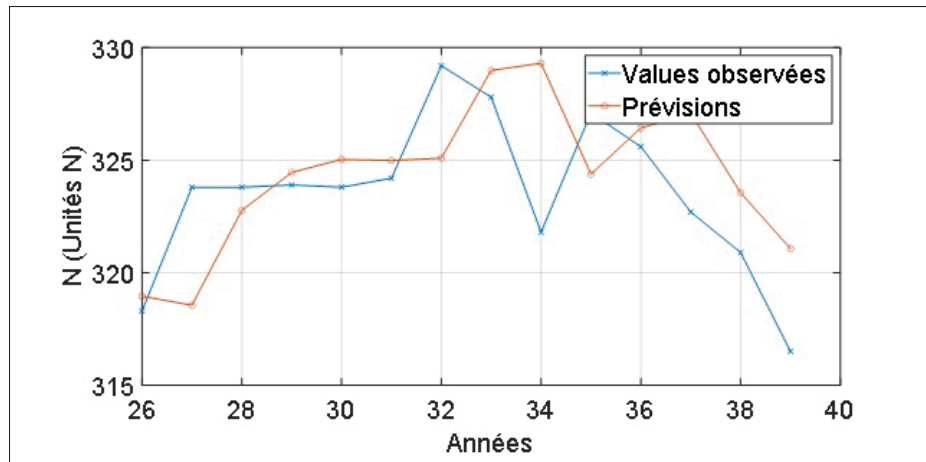


FIGURE 4.17 Valeurs observées et prévisions de N

précédente. Ainsi, les performances de la technique de prévision utilisée dépendent de l'écart entre les valeurs de N de l'année en cours et de l'année précédente.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Une méthode d'estimation à une certaine altitude h des paramètres météorologiques et de certains indices utilisés pendant la conception des LH a été donnée. La méthode utilise les valeurs mesurées au sol des paramètres météorologiques et les recommandations de l'UIT. Les formules obtenues sont utilisées dans les autres chapitres pour déterminer les paramètres d'intérêt. Le gradient du coindice de réfraction joue un rôle très important dans la conception des LH. En effet, la valeur de ce paramètre détermine la nature de la propagation des ondes radioélectriques. Ce gradient est aussi un paramètre fondamental car il permet de déterminer d'autres paramètres de la conception, comme le facteur géoclimatique et le facteur multiplicatif du rayon terrestre.

Selon l'étude de la performance des LH, basée sur la valeur de K les paramètres météorologiques ont un impact direct sur la valeur de K . Le paramètre qui a plus d'impact sur la valeur de K est l'humidité. Une relation de proportionnalité directe entre les valeurs de K et de l'humidité a été observée. La valeur de K change non seulement d'un mois à un autre et d'une saison à une autre d'une même année, mais aussi d'une année à une autre. Donc, les LH doivent être conçues en tenant compte de la caractéristique non stationnaire du climat. Dans le futur nous recommandons d'inclure à l'avance l'effet des changements climatiques dans les modèles de UIT.

Une méthode d'identification qui est basée sur l'analyse de cluster a permis d'identifier 5 zones qui ont des variations similaires de N du Nord au Sud. La pression de vapeur d'eau était le meilleur critère pour différencier les données mesurées dans les 50 stations. L'analyse à court-terme a montré que :

- 1) La valeur de N augmente du nord au sud. Dans toutes les zones, la valeur maximale de N est observée en été.
- 2) Malgré la présence de zones montagneuses, la valeur moyenne annuelle de N au Québec varie relativement peu (de 307 à 319 unités N). Ceci est principalement dû au fait que les variations

moyennes annuelles de P ont des valeurs similaires du nord au sud. La pression de vapeur d'eau et la température dépendent principalement de la latitude. Les résultats obtenus montrent que, même si les stations ont des altitudes différentes, les valeurs moyennes annuelles de e et de T augmentent du nord au sud. Indépendamment de la latitude, l'altitude dans une zone donnée a un effet significatif sur la valeur de N . Les zones montagneuses (qui ont une haute altitude) ont des faibles valeurs de N par rapport aux zones non montagneuses. Le paramètre qui contribue le plus à la diminution de N est la pression atmosphérique.

3) L'étude de la variation de N dans une zone qui comporte un cours d'eau a confirmé que l'humidité joue un rôle déterminant dans la variation de N . Ainsi, pendant la saison des pluies à cause d'un taux élevé de l'humidité, les valeurs de N sont plus grandes par rapport aux valeurs de N durant la saison sèche. Donc, la propagation des ondes radioélectriques sera plus perturbée pendant la saison des pluies.

4) L'analyse des valeurs obtenues de $dN1$ en se basant sur les paramètres météorologiques mesurés au sol à la station de Kuujuaq située dans la région Nord-Est du Québec montre que les valeurs extrêmes de $dN1$ apparaissent principalement en été. Ceci est principalement dû au fait qu'en été l'humidité et la température sont plus élevées. L'analyse montre aussi que la réfraction standard est la norme pour cette région. Cependant, il existe une faible probabilité d'apparition de la super-réfraction en juillet et en août.

Selon l'analyse des variations à long-terme des indices :

1) L'évolution de N au cours de la période analysée de 35 ans dans la région nord du Québec comporte deux cycles. Au cours du premier cycle (de décembre à mai), la variation de la température était le paramètre qui déterminait le plus l'évolution de N . Au deuxième cycle (de juin à novembre), l'humidité déterminait principalement l'évolution de N . La pression subit une légère variation durant ce cycle, ce paramètre n'a donc pratiquement aucun effet sur la

variation de N. Les tendances linéaires des variations moyennes annuelles de N au cours de la période analysée augmentent d'année en année pendant les saisons d'été et d'automne. Ceci est probablement causé par le CC. Ainsi, à l'avenir, nous recommandons de prendre en compte l'impact du CC pendant la conception des LH dans les régions arctiques. Pour chaque année de 1979 à 2013, la moyenne de dN1 varie entre -67.62 et -62.97 unités N/km. Donc, on observera une propagation normale. Les valeurs de dN1 ont été déterminées à l'aide des valeurs estimées de données météorologiques locales à une hauteur de 65 m. À l'avenir, nous espérons que les données météorologiques locales mesurées à différentes hauteurs seront disponibles. Dans ce cas, il sera nécessaire d'utiliser ces données pour déterminer les valeurs de dN1 avec une plus grande précision.

2) Une comparaison des variations de N dans les parties nord et sud du Québec montre que : Dans la partie nord du Québec la composante sèche de N subit plus de variations que celle de la composante correspondante dans la partie sud. Cependant, la différence est seulement de 6.3 unités N (déterminée à partir des données du tableau 4.6, colonne 2). Dans la partie sud la composante humide de N subit plus de variations que celle de la composante correspondante dans la partie nord. La différence est de 20.486 unités N (déterminée à partir des données du tableau 6.6, colonne trois). Ainsi, il y a plus de variabilité de Nhum par rapport à Nsec. La contribution relative maximale de Nhum dans N est d'environ 24% à Montréal et 16% à Kuujjuak. Si l'on prend en compte la tendance moyenne annuelle de N, les pentes au nord comme au sud sont positives. Cependant, les valeurs sont très différentes : 0.015 et 0.0048 unités N/an à Montréal et Kuujjuak respectivement. Dans la partie nord ainsi que dans la partie sud, août est le mois avec la valeur maximale de N. Pour ce mois, les résultats montrent que la pente de la tendance linéaire de N est positive dans les deux parties. Cependant, la pente dans la partie nord (0.15 unité N/an) est largement supérieure à la pente dans la partie sud (0.032 unité N/an).

3) Les prévisions obtenues de N avec la technique de lissage direct ont montré que cette technique permet une prévision relativement bonne des valeurs de N . Mais, cette technique a ses limites.

ANNEXE I

LES DONNÉES GÉOGRAPHIQUES DES STATIONS UTILISÉES

Les tableaux A I-1 et A I-2 montrent les noms des stations ainsi que leurs données géographiques.

TABLEAU-A I-1 Les données géographiques des stations

No.	Station	Latitude, o	Longitude, o	Altitude, m
1	Ivujivik	62.42	-77.93	47.00
2	Parc Pingualuiyt	61.31	-73.67	503.40
3	Puvirnituq	60.05	-77.28	25.30
4	Aupaluq	59.30	-69.60	36.90
5	Kangiqsualujjuaq	58.71	-65.99	66.10
6	Kuujjuaq	58.10	-68.42	39.90
7	Kuujjuarapik	55.28	-77.75	12.20
8	Grande rivière	53.63	-77.70	194.80
9	Lac Eon	51.87	-63.28	588.90
10	Nemiscau	51.70	-76.12	244.50
11	Lac Benoit	51.53	-71.11	549.00
12	Lourdes de blanc	51.45	-57.18	37.20
13	Bonnard 1	50.73	-71.01	498.00
14	Havre St-Pierre	50.28	-63.61	37.80
15	Longue pointe	50.27	-64.23	11.00
16	Natashquan	50.19	-61.79	11.90
17	Port-Menier	49.84	-64.29	55.20
18	Chibougamau	49.77	-74.53	387.10
19	Matagami	49.76	-77.79	281.00
20	Pointe des monts	49.32	-67.38	5.90
21	Baie-Comeau	49.26	-68.15	129.50
22	Cap-Madeleine	49.25	-65.32	29.00
23	Cap-Chat	49.11	-66.65	5.00
24	Onatchiway	48.89	-71.03	304.00
25	Normandin	48.84	-72.55	137.20
26	Gaspe A	48.78	-64.48	34.10
27	Pointe au Pere	48.51	-68.47	4.90
28	Jonquiere	48.43	-71.14	135.60
29	Cap D'espoir	48.42	-64.32	15.40
30	Bagotville A	48.33	-71.00	159.10

TABLEAU-A I-2 Les données géographiques des stations

No.	Station	Latitude, o	Longitude, o	Altitude, m
31	Laterriere	48.31	-71.13	162.70
32	La Baie	48.30	-70.92	151.60
33	New Carlisle 1	48.01	-65.33	46.40
34	Parent	47.92	-74.62	444.70
35	L'étape	47.56	-71.23	791.20
36	La Tuque	47.41	-72.79	168.90
37	La Pocatiere	47.36	-70.03	31.00
38	Foret Montmorency	47.32	-71.15	672.80
39	Cap-Tourmente	47.08	-70.78	6.00
40	Lemieux	46.30	-72.06	97.20
41	Maniwaki AirPort	46.27	-75.99	199.70
42	Nicolet	46.23	-72.66	8.00
43	Beauceville	46.21	-70.97	229.20
44	L'assomption	45.81	-73.43	21.00
45	Montreal/St-Hubert	45.52	-73.42	27.40
46	Ottawa Gatineau	45.52	-75.56	64.30
47	Mctavish	45.51	-73.58	72.60
48	Montreal/P. E. Trudeau	45.47	-73.74	32.10
49	Sherbroke	45.44	-71.69	241.40
50	Granby	45.37	-72.77	86.00

BIBLIOGRAPHIE

- Abdulhadi, A.-A. & Kifah, A.-A. (2010). Calculation of Effective Earth Radius and Point Refractivity Gradient in UAE. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2010, 1-4.
- AbouAlmal, A., Abd-Alhameed, R., A., Hussaini, A., Ghazaany, T., Sharon, Z., Jones, S. & Rodriguez, J. (2013a, April). *Comparison of three vertical refractivity profiles in the gulf region*. Présentation présentée à Wireless Conference (EW), Proceedings of the 2013 19th European, ISBN : 978-3-8007-3498-6, Guildford, UK.
- AbouAlmal, A., Abd-Alhameed, Raed, A., Al-Ansari, K., AlAhmad, H., See, Chan, H., Jones, Steve, M. R. & Noras, James, M. (2013b). Statistical Analysis of Refractivity Gradient and β_0 Parameter in the Gulf Region. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 61(12).
- AbouAlmal, A., Abd-Alhameed, R., A., Jones, S., M. R. & AlAhmad, H. (2014a, March-April). *New approach for predicting vertical refractivity profile in low troposphere in a subtropical region*. Présentation présentée à Computation in Electromagnetics (CEM 2014), 9th IET International Conference.
- AbouAlmal, A., Abd-Alhameed, R., A., Jones, S., M. R. & AlAhmad, H. (2014b, November). Seasonal statistics of anomalous propagation in United Arab Emirates. *Loughborough Antennas and Propagation Conference*.
- Adediji, A., T. (2017). Reduced to Sea Level Value of Microwave Radio Refractivity Over Three Stations in Nigeria. *Journal of Pure and Applied Physics*, 7(1), 19-25.
- Adediji, A., T. & Ajewole, M., O. (2008). Vertical profile of radio refractivity gradient in akure south-west Nigeria. *Progress In Electromagnetics Research C*.
- Adediji, A., T., Ajewole, M., O., Falodun, S., E. & Oladosu, O., R. (2007). Radio refractivity measurement at 150 m altitude on TV Tower in Akure, South-West Nigeria. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(2), 1308-1313.
- Adediji, A., T., Ajewole, M., O. & Falodun, S., E. (2011). Distribution of radio refractivity gradient and effective earth radius factor (k-factor) over Akure, South Western Nigeria Original Research Article. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(16), 2300-2304.

- Adediji,A., T., Ismail, M. & Mandeep,J., S. (2013, July). *Anomalous Propagation of Microwave Radio Signals Over Akure, Nigeria*. Présentation présentée à Proceeding of the 2013 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), Melaka, Malaysia.
- Agba, B. L., Ben Sik Ali, O., Morin, R. & Bergeron, G. (2011). *Recent evolution of ITU method for prediction of multipath fading on terrestrial microwave links*. Présentation présentée à PIERs, Marrakesh, Maroc.
- Agba,B., L. & BEN SIK ALI, O. (2012, April). *Experimental validation of ITU method for terrestrial line-of-sight links design*. Présentation présentée à IEEE Canadian CCECE, Montréal, Canada.
- Akinwumi,S., A., Omotosho,T., V., Willoughby,A., A., Mandeep,J., S. & Abdullah, M. (2015). Seasonal Variation of Surface Radio Refractivity and Water Vapour Density for 48 Stations in Nigeria. *International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*.
- Akpootu,D., O. & Iliyasu,M., I. (2017). Estimation of Tropospheric Radio Refractivity and Its Variation wit Meteorological Parameters over Ikeja, Nigeria. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 10(1), 1-12.
- Ali, S., Malik,S., A., Alimgeer,K., S., Khan,S., A. & Ali,R., L. (2012). Statistical estimation of tropo-spheric radio refractivity derived from 10 years meteorological data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 77(1), 96–103.
- Asiyo,M., O. & Afullo,T., J. (2013). Statistical estimation of fade depth and outage probability due to multipath propagation in southern africa. *Progress In Electromagnetics Research B*.
- Ayantunji,B., G., Okeke,P., N. & Urama,J., O. (2011). Seasonal variation of surface refractivity over Nigeria. *Advances in Space Research*, 48(12), 2023-2027.
- Beaulieu, D. & Raymond, J. (2006, April). Performance des réseaux de télécommunications pour assurer les fonctions vitales du réseau de transport.
- Bettouche, Y., Kouki,A., B., Agba,Basile, L. & Ben Sik Ali, O. (2007). Radio refractivity measurement at 150 m altitude on TV Tower in Akure, South-West Nigeria. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(2), 1308-1313.
- Bettouche, Y., Obeidat, H., Agba, B., Kouki, A., Alhassan, H. & Rodriguez,J.and Jones, S. (2019). Long-Term Evolution of The Surface Refractivity for Arctic Regions. *Radio Science*, 54(7), 602-611.

- Bettouche, Y., Agba, B., Kouki, A., Obeidat, H., Alabdullah, A., Abdussalam, F., Ghauri, S. & Abd-Alhameed, R. (2020a). Estimation and Analysis of the Radio Refractivity, its Gradient and the Geoclimatic Factor in Arctic Regions. *Progress In Electromagnetics Research M*, 92, 181-192.
- Bettouche, Y., Agba, B., Kouki, A., Obeidat, H., Ali Alabdullah, H. A., Rodriguez, J. & Abd-Alhameed, R. (2020b). Determination of Areas for Surface Refractivity Variation Analysis Over Quebec. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 208(10), 1-7.
- Bettouche, Y., Obeidat, H., Agba, B., Kouki, A., Bosleh, M., F., AlAbdullah, A., M. & Abd-Alhameed, R., A. (2020c). Comparison of Surface Radio Refractivity Variability in the Northern and Southern Parts of Quebec, Canada. *Radio Science*, 55(7), 1-8.
- Bogucki, J. & Wielowieyska, E. (2009). Radio refractivity measurement at 150 m altitude on TV Tower in Akure, South-West Nigeria. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2, 48-52.
- Boumis, M., Rezacova, D. & Soko, Z. (1999). Calculation of vertical gradient of atmospheric refractivity making use of 3D objective analysis technique. *ELECTRONICS LETTERS*, 35(18).
- Canada, G. (2020). Données climatiques historiques. Repéré à <http://climat.meteo.gc.ca/>.
- Doe, J., Doe, J. & Doe, J. (2013). *Impact des changements climatiques sur l'ingénierie des communications sans fil – Cas des liaisons hertziennes*. Présentation présentée à EIC Climate Change Technology, Lieu de la conférence.
- Douglas, C., M., Lynwood, A., J. & John, S. (1990). *Forecasting and time series analysis* (éd. 2). Columbus, OH : McGraw-Hill, Inc.
- Dubes, R., C. & Jain, A., K. (1988). *Algorithms for clustering data* (éd. 1). Prentice-Hall.
- Falodun, S., E. & Ajewole, M., O. (2006). S.E. Falodun, M.O. Ajewole, Radio refractive index in the lowest 100-m layer of the troposphere in Akure, South Western Nigeria. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68, 236–243.
- Famoriiji, J. O. & Olayinka, Oyeleye, M. (2013). A test of the relationship between refractivity and radio signal propagation for dry particulates. *Research Desk*, 2(4), 334-338.

- Ghazali, Hamza, M., Latiff, Liza, A., Eltayeb, M., M. & Gasim, Waleed, M. (2017, January). *Radio Propagation and Troposphere Parameters Effect for Microwave Links in Sudan*. Présentation présentée à International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE), Khartoum, Sudan.
- Grabner, M. & Kvicera, V. (2003a). Clear-Air Propagation Modeling Using Parabolic Equation Method. *RADIOENGINEERING*, 12(4).
- Grabner, M. & Kvicera, V. (2003b). *Introduction to project of refractive index measurement in Prague*. Présentation présentée à Antennas and Propagation, Twelfth International Conference, (Conf. Publ. No. 491), Prague.
- Grabner, M., Kvicera, V., Pechac, P. & Mudroch, M. (2010, April). *Multipath Fading Measurement and Prediction on 10 GHz Fixed Terrestrial Link*. Présentation présentée à Conference on Microwave Techniques (COMITE), Czech Republic.
- Grabner, M., Kvicera, V., Pechac, P. & Jicha, O. (2012). *Parameters of vertical profiles of temperature, humidity and refractive index of air in the lowest troposphere*. Présentation présentée à Proc. of 9th International Symposium on Tropospheric Profiling (ISTP), L'Aquila, Italy.
- Hydro-Québec. (2022). Transénergie et Équipement. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/transenergie/fr/>.
- ITU. (1994). *Recommendation ITU-R PN.310-9, Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media*. International Telecommunication Union.
- ITU. (1996a). *Handbook on Radiometeorology*. Geneva : ITU R Bureau.
- ITU. (1996b). *Handbook on Radiometeorology*. Geneva : Radiocommunication Bureau.
- ITU. (2007a). Testing multipath fading distribution prediction methods. *Document 3M/214-E, Question ITU-R 206/3*.
- ITU. (2007b). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of sight systems. *Recommendation, ITU-R, P.530-12*.
- ITU. (2013). *Manuel de radiométéorologie*. Bureau des radiocommunications.
- ITU. (2017a). The Radio Refractive Index : its Formula and Refractivity Data. *Recommendation, I. (2017). 453-13*.

- ITU. (2017b). Reference Standard Atmospheres : ITU-R. *Recommendation, I.* (2017). 835-6. *Recommendations and Reports of the ITU-R.*
- ITU. (2019). Definitions of the terms relating to propagation in non-ionized media. *Recommendation, ITU-R P.310-10.*
- ITU-R. (2012). The radio refractive index : its formula and refractivity data. *Recommendation of ITU-R P.453-10.*
- ITU-R. (2015). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. *Recommendation of ITU-R P.530-15.*
- Jonhsnhweather. (2018). Vapor Pressure. Retrieved 22/01/2018. Repéré à <http://www.johnsnhweather.com/formulas/vaporPressure.html>.
- Kablak,N., I. (2007). Refractive index and atmospheric correction to the distance to the Earth's artificial satellites. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 23(2), 84–88.
- Kaufman, L. & Rousseeuw,P., J. (1990). *Finding groups in data : An introduction to cluster analysis* (éd. 1). John Wiley and Sons.
- Kifah,Al, A. & Rami,A., K. (2008). Correlation between ground refractivity and refractivity gradient and their statistical and worst month distributions in abu dhabi. *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 73.
- Leclert, A. (1984). Propagation dans l'atmosphere 1ere partie : Influence sur les faisceaux hertziens numériques à grande capacité. *L'écho des recherches*, (117).
- Lehpamer, H. (2010). *Microwave Transmission Networks, Planning, Design, and Deployment* (éd. 2). USA : McGraw-Hill.
- Liebe,H., J. (1987). A Contribution to Modeling Atmospheric Millimeter-wave Properties. *Frequenz*, 41(1), 31-36.
- MathWorks. (1993). *Statistics Toolbox for Use with MATLAB, User's Guide* (éd. 5). The MathWorks.
- Norland, R. (2006, May). *Temporal variation of the refractive index in coastal waters*. Présentation présentée à Proceedings of International Radar Symposium IRS, Poland.
- NPCC. (2004). Basic Criteria for Design and Operation of interconnected Power Systems.

- Odedina, P., K. & Afullo, T., J. O. (2007, October). *Use of Spatial Interpolation Technique for Determination of Geoclimatic Factor and Fade Depth Calculation in Southern Africa*. Présentation présentée à IEEE AFRICON, Windhoek, South Africa.
- Oluwole, Famoriji, J. (2013). Variation of Metrological Parameters as They Affect the Tropospheric Radio Refractivity for Akure South-West Nigeria. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 7(10).
- Paulson, K. (2011). The effects of climate change on microwave telecommunications. Dept. of Eng., Univ. of Hull, Kingston upon Hull, UK.
- Priestley, J., T. & Hill, R., J. (1985). Measuring high-frequency humidity and radio refractive index in the surface layer. *Journal of Atmospheric and oceanic technology*, 2(2), 233–251.
- Saeed, R., Asad, U. & Naveed, M. (2015, August). *Refractivity Gradient in Lowest Layer of Atmosphere near Arabian Sea*. Présentation présentée à Proceeding of the 2015 International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), Langkawi, Malaysia.
- Sizun, H. & Fornel, P. (2005). *Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications* (éd. 1). Springer.
- Sizun, H. (2005). *Propagation des ondes radio pour applications en télécommunications*. German : Verlag Berlin Heidelberg.
- TransÉnergie, H.-Q. (2001). Les critères de conception du réseau de transport principal.
- TransÉnergie, H.-Q. (2002a). Exploitation d’une ligne de transport”, GEN-D-17, Contrôle des mouvements d’énergie.
- TransÉnergie, H.-Q. (2002b). Les besoins de TransÉnergie en télécommunication.
- Valma, E., Tamosiunaite, M., Tamosiunas, S., Tamosiuniene, M. & Zilinskas, M. (2010). Determination of Radio Refractive Index using Meteorological Data. *Electronics and electrical engineering*, 106(10), 1392-1215.
- Zilinskas, M., Tamosiunaite, M., Tamosiuniene, M., Valma, E. & Tamosiunas, S. (2012, August). *Gradient of radio refractivity in troposphere*. Présentation présentée à Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia.