

RAPPORT DE STAGE DE FIN D'ETUDES

# Création d'un outil de détection préventive d'épisodes de propagations exceptionnelles

---

Agence nationale des fréquences

**Lancine Sérifou (ANFR \ Maison Alfort)**

**23/09/2019**

Parmi les perturbations de la réception de la télévision, les épisodes de propagations exceptionnelles des ondes radioélectriques affectent régulièrement certaines régions de France, particulièrement le littoral. En effet, sous certaines conditions climatiques, la portée de signaux potentiellement perturbateurs devient anormalement importante. Ce rapport présente les travaux réalisés pour prévenir l'apparition de ces phénomènes.



## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	3
GLOSSAIRE .....	4
LISTE DES FIGURES.....	5
INTRODUCTION .....	6
PARTIE I. PRESENTATION DE L'ANFR.....	7
I.1 Le gardien de spectre.....	7
I.2 La protection de la réception de la télévision hertzienne.....	8
I.3 Le projet de modélisation d'épisodes de propagations exceptionnelles .....	9
PARTIE II : LA COMPREHENSION DU PHENOMENE .....	10
II.1 La propagation exceptionnelle des ondes dans l'air.....	10
II.2 Les conditions météorologiques.....	16
II.3 L'impact sur la réception de la TNT.....	19
PARTIE III. LA MODELISATION DU PHENOMENE .....	20
III.1 Choix de méthode de modélisation.....	20
III.2 Identification et choix d'un fournisseur de données météorologiques.....	21
III.3 L'automatisation de la collecte et du traitement des données météorologiques .....	23
III.4 Les premiers résultats .....	31
CONCLUSION.....	34
BIBLIOGRAPHIE .....	35

## REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce stage.

Tout d'abord, mes profonds remerciements à ma famille toute entière et en particulier à mon père et ma mère pour les valeurs qu'ils m'ont inculquées sans oublier leur soutien moral et financier durant toutes ces années d'études.

Je tiens à remercier vivement mes deux responsables de stage monsieur **Willy Sextius**, chef du département Radiodiffusion, et monsieur **Anh Tuan Hoang**, Ingénieur en télécommunication, pour leur disponibilité et leurs conseils. Grâce à leurs expertises et la confiance qu'ils ont en moi j'ai pu accomplir les tâches qui m'ont été confiées.

Je remercie toute l'équipe de L'ANFR pour l'accueil et la facilité d'intégration que j'ai pu avoir dès mon arrivée. Merci **Sami Lazar**, directeur des conventions, pour ses conseils pendant nos entretiens, à **Sylvie Thomas**, agent en charge des ressources humaines, pour son support sur l'ensemble du stage. Merci **Cécile Bailoni**, **Jérémy Lebrun**, **Sarah Thiroux**, **Bertrand Bloind**, **Eck Eef Van**, **Sylvain Siquier**, du département radiodiffusion, pour leurs soutiens et encouragements.

Je remercie tous mes professeurs au sein de l'école d'ingénieurs sup-Galilée. Merci Mr **Olivier Lafitte**, responsable de la spécialité Mathématiques Appliquées et Calcul Scientifique (MACS) pour sa visite pendant le stage et ses conseils ainsi que Mr **Emmanuel Audusse**, directeur d'étude de la spécialité MACS. Merci à Mme **Angélique Leite**, secrétaire de la spécialité MACS, pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Enfin, à tous mes amis étudiants avec qui nous avons passé ces moments d'apprentissages, je vous dis merci.

Conscient de n'avoir pu citer toutes les personnes qui m'ont apporté une aide dans la réalisation de ce projet, je vous dis sincère merci.

## **GLOSSAIRE**

ANFR	: Agence nationale des fréquences
CSA	: Conseil supérieur de l'audiovisuel
DC	: Direction des conventions
GRIB	: GRIdded Binary
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
OACI	: Organisation Internationale de l'aviation
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
PPM	: Partie Par Millions
PRTV	: Protection de la réception de la télévision
TNT	: Télévision numérique terrestre
UIT	: Union internationale des télécommunications

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Exemples de domaines dépendants des fréquences .....	7
Figure 2. Exemples d'entreprises tributaires des fréquences .....	7
Figure 3. Extrait du tableau national de répartition des bandes de fréquences.....	8
Figure 4. Evolution de la température avec l'altitude sous conditions atmosphériques "normales" .....	10
Figure 5. La loi de Snell-Descartes .....	11
Figure 6. Propagation d'une onde en fonction de la valeur critique -157/km de gradient de N.....	16
Figure 7. Les types de propagation d'une onde en fonction de gradient de N.....	16
Figure 8. Inversion frontale de température.....	17
Figure 9. Inversion de température par rayonnement.....	17
Figure 10. Inversion de température par subsidence. ....	18
Figure 11. Inversion de température par advection. ....	18
Figure 12. Evaporation d'une surface humide. ....	18
Figure 13. Situation normale .....	19
Figure 14. Situation de propagation exceptionnelle.....	19
Figure 15. Exemple d'affichage d'un fichier GRIB sous ZyGrib : Tempête du 15/12/2011 (Source NOAA, modèle GFS) .....	22
Figure 16. Le site de la NOAA.....	25
Figure 17. Présentation de R-studio sous Windows .....	25
Figure 18. Les découpes géographiques retenues.....	26
Figure 19. Le << dataframe >> de données météorologiques.....	27
Figure 20. (de gauche à droite) Répartition des températures et des co-indices via une boîte à moustache. ....	29
Figure 21. Le << dataframe >> avec les valeurs des gradients de co-indice N.....	30
Figure 22. Les étapes de traitement des données météorologiques par l'automate.....	31
Figure 23. La palette de couleur.....	31
Figure 24. Prévision du 9 août à 12h : Résolution [56 km x 56 km x 29 altitudes].....	32
Figure 25. Prévision du 29 août à 12h : Résolutions [28 km x 28 km x 8 altitudes] & [56 km x 56 km x 29 altitudes].....	32

## **INTRODUCTION**

Ce stage, positionné entre la fin des études et le début de la carrière professionnelle, est une bonne expérience du fait de la mise en pratique d'une partie des connaissances acquises sur des cas concrets en entreprise avec des méthodes de travail liées aux activités du monde professionnelle. C'est ainsi que dans le cadre de ma dernière année d'école d'ingénieur en Mathématiques Appliquées et Calcul Scientifique de Sup-Galilée (université Paris 13), j'ai pu intégrer l'Agence nationale des fréquences du 08 avril au 30 septembre 2019 au siège de Maisons-Alfort au sein de l'équipe du département Radiodiffusion.

Le sujet de ce stage concerne les épisodes de propagations exceptionnelles des ondes radioélectriques qui perturbent occasionnellement la réception hertzienne de la TNT, sous certaines conditions climatiques. Le but est de modéliser leurs détections à partir des prévisions météorologiques.

Ce document détaillera les éléments permettant de comprendre ce phénomène, la réalisation d'un logiciel de traitement automatique des données météorologiques et la restitution des premiers résultats. Dans ce rapport je développerai mes contributions dans ce projet en commençant par son contexte pour terminer sur un bilan personnel.

Je vous souhaite une bonne lecture !





L'ANFR s'assure de la coexistence des fréquences entre tous les utilisateurs.

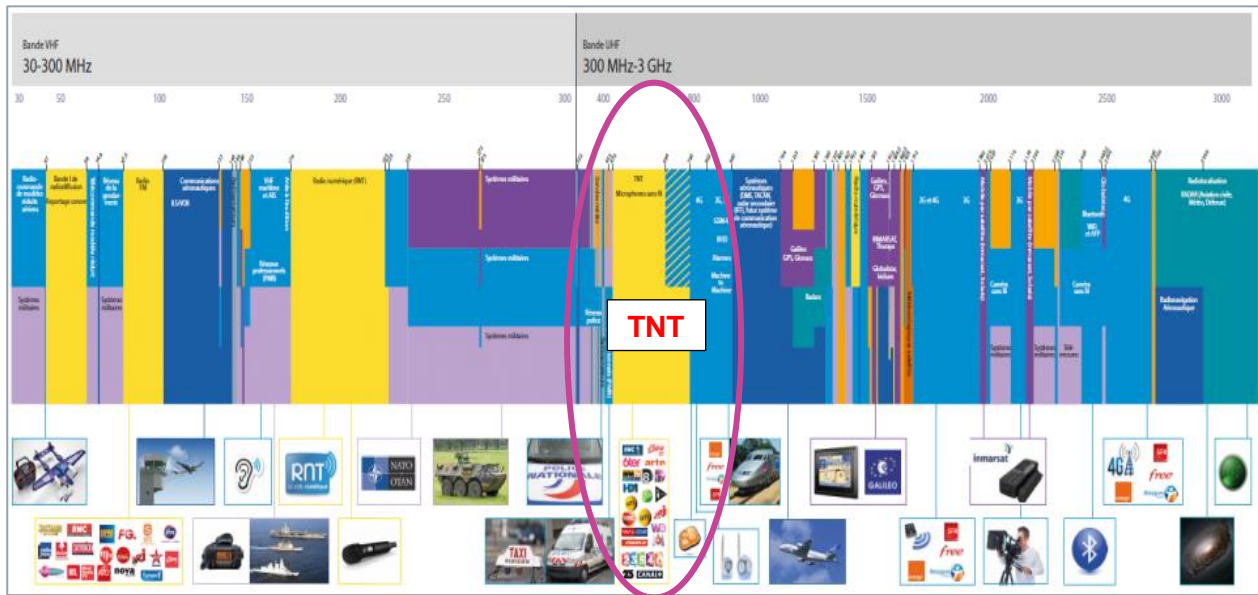


Figure 3. Extrait du tableau national de répartition des bandes de fréquences

Il convient de noter que les bandes de fréquences sont réparties entre 11 affectataires comme le CSA, l'Aviation civile, l'ARCEP, l'intérieur ou la défense.

Les principales missions de l'ANFR sont :

- La négociation à internationale pour défendre les positions françaises dans le domaine du spectre
- La délivrance d'accord autorisant l'implantation de sites d'émission sur l'ensemble des territoires français
- Le regard sur l'exposition du public aux ondes
- Le transfert d'usages des bandes de fréquences
- Le contrôle du spectre et la résolution de brouillage

## 1.2 La protection de la réception de la télévision nationale terrestre

De par l'article 22 de la loi du 30 septembre 1986, le CSA et l'ANFR prennent des mesures pour assurer une bonne réception des signaux de télévision et concluent entre eux à cet effet les conventions nécessaires.

Ainsi, la Direction des Conventions (DC) de l'ANFR assure, entre autres, cette mission de protection de la réception de la télévision (PRTV). A ce titre, elle dispose d'un département « radiodiffusion », en relation directe avec le CSA et les opérateurs de multiplex, en charge des aspects techniques de la PRTV et du soutien technique aux différentes directions de l'Agence, sur l'ensemble des problématiques liées à la planification de la radiodiffusion.

L'activité du département « radiodiffusion » consiste principalement :

- à instruire les réclamations des téléspectateurs par le biais d'une étude technique afin d'identifier l'origine des éventuels brouillages,

- à soutenir le projet de transfert de la bande des 700 MHz de la diffusion audiovisuelle vers les services de très haut débit mobile,
- à analyser et suivre, auprès des acteurs, les zones de réception à difficultés chroniques ainsi que les défauts de diffusion du réseau d'émetteurs TNT et proposer des solutions pour résoudre ces problématiques complexes,
- à détecter, grâce à sa cellule « Temps réel », les événements susceptibles de perturber la réception de la télévision afin d'en informer les téléspectateurs concernés.

Si leurs installations ne sont pas défectueuses, les téléspectateurs peuvent saisir l'ANFR pour enquêter sur l'origine des perturbations qu'ils constatent en réception de la TNT par voie hertzienne terrestre (c'est-à-dire, distribuée à partir de leur antenne réseau). Un centre d'appel et un site internet sont mis à leur disposition pour toutes réclamations ou informations sur des problèmes préalablement identifiés sur leur secteur.

Pour faire cesser les perturbations de réception de la télévision, l'ANFR a mis en place un processus approprié, à savoir :

- demander des travaux au(x) responsable(x) de brouillages locaux,
- transmettre ces analyses et mesures aux opérateurs de multiplex pour actions sur leur réseau d'émetteurs TNT lors de défauts de diffusion, ou au CSA pour réviser ponctuellement sa planification des fréquences de la TNT,
- renvoyer le plaignant vers un professionnel de la réception lors d'un défaut d'installation,

Parmi les perturbations de la réception de la télévision, les épisodes de propagations exceptionnelles des ondes radioélectriques affectent périodiquement, sous certaines conditions climatiques, quelques régions de France, particulièrement le littoral.

### **I.3 Le projet de modélisation d'épisodes de propagations exceptionnelles**

Chaque année se produit des phénomènes de propagations exceptionnelles suite à des variations particulières de température ou d'humidité dans les couches basses de la troposphère et qui vont augmenter la portée des ondes. De ce fait, des fréquences en provenance d'émetteurs lointains peuvent être reçues sur des zones où elles sont déjà exploitées pour la réception de la TNT, ce qui peut créer des interférences.

Le projet a pour objectifs :

- d'établir une étude bibliographique permettant la compréhension et la restitution de ces phénomènes de propagations exceptionnelles des ondes radioélectriques,
- de préparer les conditions nécessaires à la collecte des données météorologiques propres à ces phénomènes,
- et de développer un outil représentant, par anticipation, les zones qui seront exposées aux propagations exceptionnelles.

A l'issue du stage, le modèle de prédiction pourra être affiné par l'analyse des perturbations archivées, des relevés de mesures et l'ajustement de ses paramètres avec le résultat des premières prévisions.

## **PARTIE II : LA COMPREHENSION DU PHENOMENE**

### **II.1 La propagation exceptionnelle des ondes dans l'air**

#### **Présentation de l'atmosphère**

Avant d'aborder la notion de propagation exceptionnelle, nous allons d'ors et déjà présenter brièvement l'atmosphère qui est constitué de 5 couches que sont : l'ionosphère, la thermosphère, la mésosphère, la stratosphère et la troposphère.

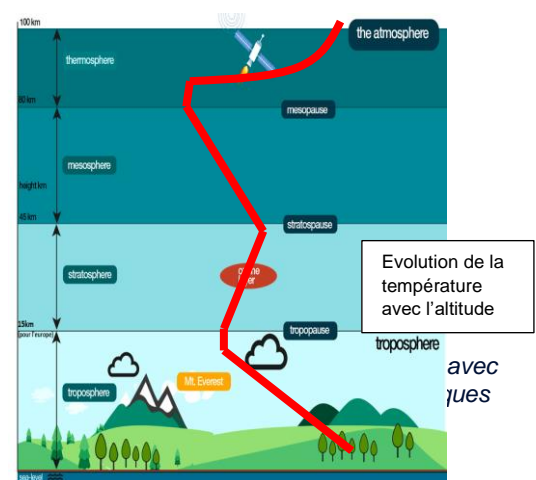
La troposphère est la région inférieure de l'atmosphère terrestre, immédiatement au-dessus de la surface de la terre. Elle s'étend du niveau du sol à 7 km aux pôles et jusqu'à 17 km à l'équateur (15km pour l'Europe).

Les ondes VHF se propagent que dans la troposphère (d'après la référence Cycle 23-24 Sunspot Number prediction publié en 2007). A priori les ondes UHF aussi ne se propagent que dans la troposphère.

Comme on peut le voir sur la figure 4, la température  $T(z)$  décroît linéairement avec l'altitude  $z$  dans la troposphère. Cette décroissance est précisément de  $6^{\circ}\text{C}$  par km selon l'OACI.

Cependant, sous certaines conditions environnementales particulières une augmentation de  $T(z)$  avec  $z$  est définie par la recommandation UIT- R P.310-9 [1].

On parle dans ce cas précis d'inversion de température. Suite à des effets de cette inversion de température les couches d'air tels des couloirs aériens peuvent guider les signaux radioélectriques. C'est le guide d'onde ou le conduit.



Maintenant intéressons-nous au parcours d'une onde radioélectrique.

Pour rappel, l'indice de réfraction  $n$  caractérise le comportement d'une onde dans un milieu.

Elle représente le rapport de la vitesse des ondes dans le vide par leur vitesse dans le milieu considéré :  $n = \frac{3 \cdot 10^8}{v}$

### Enoncé de la loi de Snell-Descartes

Le rayon réfracté, le rayon incident et la normale sont dans un même plan, le plan d'incidence. Le rayon incident et le rayon réfracté sont situés de part et d'autre de la normale.

La relation liant les indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  de chacun des milieux et les angles incident  $\theta_1$  et réfracté  $\theta_2$ , appelée relation de Snell-Descartes, s'écrit :

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) \quad (1)$$

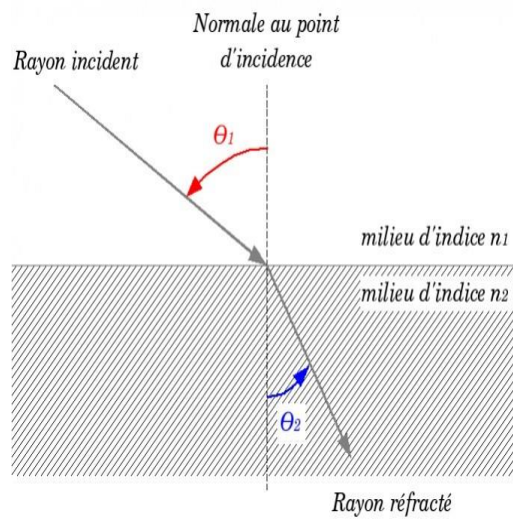


Figure 5. La loi de Snell-Descartes

Comme un rayon lumineux est dévié lorsqu'il passe d'un milieu d'indice de réfraction  $n_1$  à un autre milieu d'indice  $n_2$ , une onde radioélectrique peut subir un changement de direction dépendant à la fois de sa fréquence et de la variation de l'indice de réfraction.

### Co-indice de réfraction N

On sait que la valeur de l'indice de réfraction de l'air :  $n_{air} = 1,0003$ . Puisque  $n_{air}$  ne varie que de quelques unités de l'ordre de  $10^{-4}$ , il convient donc de considérer la variation de  $n_{air}$  en termes de :

$$n_{air} = 1 + N * 10^{-6} \text{ donc } N = (n_{air} - 1) * 10^6 \quad (2)$$

N est appelé le co-indice de réfraction.

Maintenant nous allons chercher à expliciter l'expression de  $N$  en fonction des données météorologiques.

Pour cela, nous utilisons des équations empiriques, basées sur l'expérience et ignorant le comportement des gaz non idéal (compressibilité) de l'air.

Cependant, certaines constantes ont été dérivées après avoir pris en compte le comportement du gaz réel (par exemple : Birnbaum Chatterjee 1952 et Boudouris 1963) [2].

Thayer [3], dans son livre sur l'amélioration de l'équation du co-indice de réfraction paru en 1974, a indiqué que l'omission du facteur de compressibilité de l'air sec entraîne des erreurs d'environ 0,04 ppm ( $ppm = \frac{1}{10^6} = 10^{-6}$ ) à 500 hpa (hectopascal) et celle du facteur de compressibilité de la vapeur d'eau à 0,1 ppm à haute humidité. Owens [4], dans son livre paru en 1967, a noté que la densité partielle du dioxyde de carbone  $CO_2$  est toujours si faible que le comportement idéal des gaz peut être « assumé » pour le  $CO_2$ .

Le co-indice de réfraction  $N$  des ondes radioélectriques peut être exprimé par :

$$N = K_1' * \frac{P_{d-c}}{T} + K_2 * \frac{P_w}{T} + K_3 * \frac{P_w}{T^2} + K_4 * \frac{P_c}{T} \quad (3)$$

Où :

$P_w$  est la pression partielle de vapeur d'eau (en hpa)

$P_c$  est la pression partielle du  $CO_2$  (en hpa)

$T$  est la température exprimé en Kelvin

$P_{d-c} (= P_d - P_c = P_{total} - P_w - P_c)$  est la pression partielle de l'air sec exempt de  $CO_2$  (en hpa)

$P_d (= P_{total} - P_w)$  est la pression partielle de l'air sec (en hpa)

$K_{i=\{2,3,4\}}$  sont des constants

$K_1'$  est la constante sans la composante  $CO_2$

En raison de sa nature polaire, la vapeur d'eau a une densité ( $K_2$ ) et un terme densité-température ( $K_3$ ).

L'une des méthodes de calculs qui existent pour trouver l'expression du co-indice de réfraction  $N$  est un calcul basé sur les « meilleurs coefficients » disponibles.

Nous allons donc appliquer cette méthode pour trouver l'expression explicite de  $N$ .

D'abord, suite à une suggestion de Hill [5] en 1995, les termes  $K_2$  et  $K_3$  sont tirés des résultats de Boudouris [2] et le terme  $K_1'$  (air sec sans le  $CO_2$ ) ainsi que le terme dioxyde de carbone  $K_4$  sont tirés des résultats de Liebe [6] et de Newell-baird [7].

On a donc :

$$K_1' = 77.674 \pm 0.013 \left[ \frac{\text{Kelvin}}{\text{hPa}} \right] \quad (4)$$

$$K_2 = 71.97 \pm 10.5 \left[ \frac{\text{Kelvin}}{\text{hPa}} \right] \quad (5)$$

$$K_3 = 375406 \pm 3000 \left[ \frac{\text{Kelvin}^2}{\text{hPa}} \right] \quad (6)$$

$$K_4 = 133.484 \pm 0.022 \left[ \frac{\text{Kelvin}}{\text{hPa}} \right] \quad (7)$$

Boudouris [2] a déduit les coefficients  $K_2$  et  $K_3$  d'une solution de régression linéaire de ses mesures à des températures de  $0^\circ$  à  $+63^\circ$  et à la pression de vapeur d'eau de 0 à 127 mm hPa.

Les valeurs mesurées pour  $K_1'$  et  $K_4$  ont également été données par Liebe[6] comme étant égal à  $133.5 \pm 0,15 \left[ \frac{\text{Kelvin}}{\text{hPa}} \right]$  et par Zhevakin-Naumov[8] comme à  $129,30 \pm 0,02 \left[ \frac{\text{Kelvin}}{\text{hPa}} \right]$ .

Considérant que l'omission du terme  $CO_2$  entraîne une erreur de seulement 0,02 (selon Hartmann [9] et Leitingner [10]) et que la teneur en  $CO_2$  de l'air est rarement géodésistes, il est souvent

approprié d'adopter une valeur actuelle pour la teneur en  $CO_2$  et fusionner les termes  $K_1'$  et  $K_4$  pour donner le terme air sec que nous notons  $K_1$  :

$$K_1 * \frac{P_d}{T} = K_1' * \frac{P_{d-c}}{T} + K_4 * \frac{P_c}{T} = K_1' * \frac{P_d}{T} - K_1' * \frac{P_c}{T} + K_4 * \frac{P_c}{T} = K_1' * \frac{P_d}{T} + (K_4 - K_1') * \frac{P_c}{T} \quad (8)$$

En supposant, au départ, la teneur traditionnelle en  $CO_2$  de 300 ppm (0,03%) pris comme  $0,0003 * P_d$ , alors :

$$\begin{aligned} [K_1 + 0,0003 * (K_4 - K_1')] * \frac{P_c}{T} &= (77,674 + 0,017) * \frac{P_d}{T} \\ &= 77,691 * \frac{P_d}{T} \end{aligned} \quad (9)$$

De plus, d'après (4) et (6), les trois derniers termes de l'équation (3) pour l'air à 0,03% (300 ppm) de  $CO_2$  est la suivante :

$$N = 77,691 * \frac{P_d}{T} + 71,97 * \frac{P_w}{T} + 375406 * \frac{P_w}{T^2} \quad (10)$$

Le terme sec du co-indice de réfraction  $N_{sec}$  est :  $N_{sec} = 77,691 * \frac{P_d}{T}$  (11)

Et le terme humide du co-indice de réfraction,  $N_{humide}$  est :

$$N_{humide} = 71,97 * \frac{P_w}{T} + 375406 * \frac{P_w}{T^2} \quad (12)$$

Avec :

$N$  : le co-indice de réfraction (en ppm)

$P_d$  : la pression atmosphérique sèche (en hpa) ,  $p_d (= P_{total} - P_w)$

$P_w$  : la pression partielle de vapeur d'eau (en hpa)

$P_{total}$  : la pression atmosphérique totale (en hpa)

$T$  : la température (en K)

Etant donné  $P_d = P_{total} - P_w$ , l'équation (10) devient :

$$N = 77,691 * \frac{P_{total} - P_w}{T} + 71,97 * \frac{P_w}{T} + 375406 * \frac{P_w}{T^2} \quad (13)$$

$$= 77,691 * \frac{P_{total}}{T} - 5,721 * \frac{P_w}{T} + 375406 * \frac{P_w}{T^2} \quad (14)$$

Une approximation de l'équation (14) avec une précision moindre s'écrit comme suit :

$$N = 77,691 * \frac{P_{total}}{T} + 373256 * \frac{P_w}{T^2} \quad (15)$$

L'UIT, à travers la recommandation UIT-R P.453-13, confirme bien cette expression du co-indice de réfraction et mentionne également que l'équation (15) donne les valeurs de  $N$  avec une précision de  $\pm 0,02\%$  par rapport à la valeur obtenue dans l'équation (10) pour des températures comprises entre  $-50^\circ C$  et  $+40^\circ C$ .



D'autre part, la recommandation UIT-R P.453-13 [11] donne la relation entre la pression partielle de vapeur d'eau  $P_w$  et l'humidité relative  $H$  par :

$$P_w = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (16)$$

$$e_s = a * \exp\left(\frac{b \cdot (T - 273.15)}{c + T - 273.15}\right) \quad (17)$$

Où :  $e_s$  est la pression saturante de l'eau à la température  $T$  (en  $K$ ) et  $H$  est l'humidité relative (en %). Pour l'eau liquide, on a :  $a = 6.1121$ ,  $b = 17.502$ ,  $c = 240.97$  et le co-indice de réfraction peut alors se réécrire, en notant  $P_{total}$  tout simplement  $P$  comme suit :

$$N = 77.691 * \frac{P}{T} + 373256 * \frac{P_w}{T^2} = 77.691 * \frac{P}{T} + 373256 * \frac{H \cdot e_s}{100 \cdot T^2} \quad (18)$$

$$N = 77.7 * \frac{P}{T} + 22813.8 * H * \exp\left(\frac{(T - 273.15) * \left(\frac{3833.65 - T}{234.5}\right)}{\frac{T - 16}{T^2}}\right) \quad (19)$$

Cette dernière expression dépend exclusivement des données météorologiques  $P$ ,  $T$  et  $H$ . C'est donc celle-ci que nous retiendrons au final.

Maintenant que nous avons l'expression du co-indice de réfraction, étudions la courbure d'une onde radioélectrique.

### Rayon de courbure d'une onde radioélectrique

Selon la recommandation d'UIT P.834-7 [13], un rayon radioélectrique traversant la couche inférieure (non ionisée) de l'atmosphère est courbé par l'existence d'un gradient de co-indice de réfraction.

Comme l'indice de réfraction varie principalement avec l'altitude, dans la plupart des cas, on considère seulement le gradient vertical de l'indice de réfraction. La courbure en un point est alors contenue dans le plan vertical et s'exprime par :

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\cos(\varphi)}{n} * \frac{dn}{dz} \quad (20)$$

Où :

$\rho$  : rayon de courbure de la trajectoire du rayon

$n$  : indice de réfraction de l'atmosphère

$\frac{dn}{dz}$  : gradient vertical de l'indice de réfraction

$z$  : altitude du point au-dessus de la surface terrestre

$\varphi$  : angle de la trajectoire du rayon avec l'horizontale au point considéré.

Par convention, la courbure des rayons est définie comme étant positive quand sa concavité est orientée vers la surface de la Terre.

Par ailleurs,  $\varphi \simeq 0$  pour un trajet quasiment horizontal et  $n = 1,0003$ . Alors d'après la relation (2), on obtient :

$$\frac{1}{\rho} \simeq -\frac{dn}{dz} = -10^{-6} * \frac{dN}{dz} \quad (21)$$

On voit bien que la courbure de trajectoire de l'onde dépend du gradient du co-indice de réfraction :  $\frac{dN}{dz}$

Par ailleurs, comme mentionné en début du chapitre, en cas d'inversion de température lorsque  $z$  croît,  $T(z)$  croît aussi et  $N(T)$  décroît. Donc  $\frac{dN}{dz} < 0$ ,  $\frac{1}{\rho} > 0$  et  $\rho > 0$ . C'est-à-dire que l'onde a tendance de retourner au sol. Ainsi nous venons d'établir le lien entre l'inversion de température et le gradient de co-indice / la courbure d'une onde.

Des calculs géométriques montrent que si le gradient  $\frac{dN}{dz}$  atteint une décroissance de  $-157 (km^{-1})$  alors la réfraction est telle que l'onde suit parfaitement la courbure moyenne du globe terrestre. Si  $\frac{dN}{dz} > -157 (km^{-1})$ , l'onde a tendance à partir vers le ciel. Si  $\frac{dN}{dz} < -157 (km^{-1})$ , l'onde se courbe vers la terre. Dans ce cas, ce sont des propagations exceptionnelles où l'onde est piégée dans un « guides d'ondes troposphérique ».



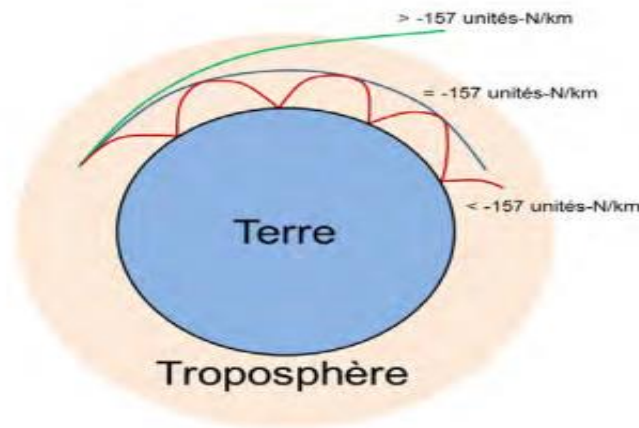


Figure 6. Propagation d'une onde en fonction de la valeur critique  $-157/\text{km}$  de gradient de  $N$

### Types de propagation d'une onde radioélectrique

En fonction de gradient de  $N$ , nous avons plusieurs types des propagations :

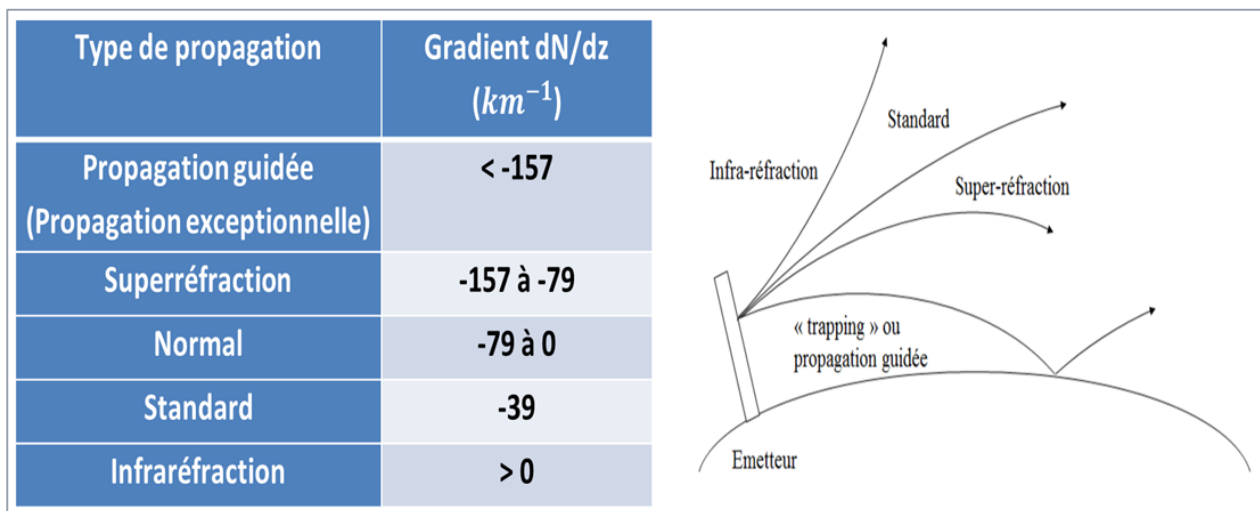


Figure 7. Les types de propagation d'une onde en fonction de gradient de  $N$

## II.2 Les conditions météorologiques

La formule (18) permet d'établir que les « guides d'ondes troposphérique » apparaissent en cas d'inversion de la température ou de décroissance de l'humidité.

Les conditions météorologiques associées à l'inversion de température et à la décroissance de l'humidité sont :

**L'inversion frontale :** Pendant le passage d'un front, il y a lors, une inversion thermique qui se produit au-dessus d'un point donné. L'air chaud plus léger est alors présent au-dessus de l'air froid sans pour autant qu'il ne soit évacué.

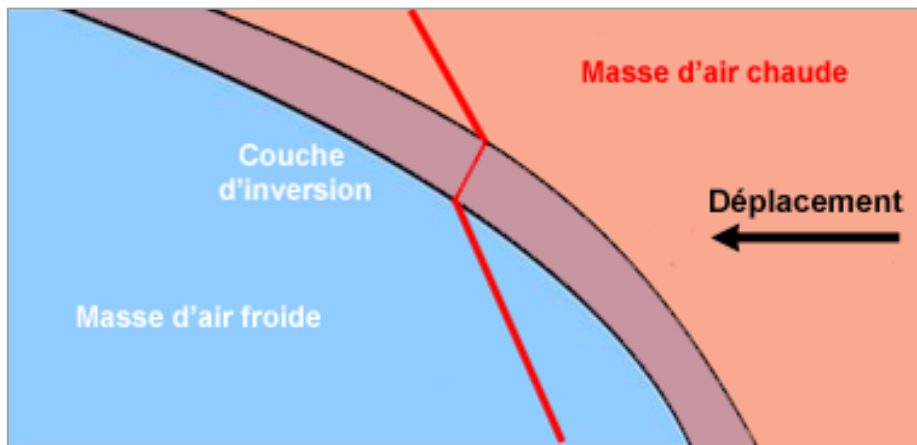


Figure 8. Inversion frontale de température

**L'inversion de température par rayonnement :** Cette inversion thermique a lieu lorsque le refroidissement du sol et des couches basses de la troposphère est plus rapide que des couches hautes.



Figure 9. Inversion de température par rayonnement.

**L'inversion de température par subsidence :** Directement lié à la présence d'anticyclone. L'air descendant en direction du sol se réchauffe par compression. Il arrive que cet air descendant soit plus chaud que l'air se trouvant en-dessous et forme une "cloche" au-dessus des basses couches.

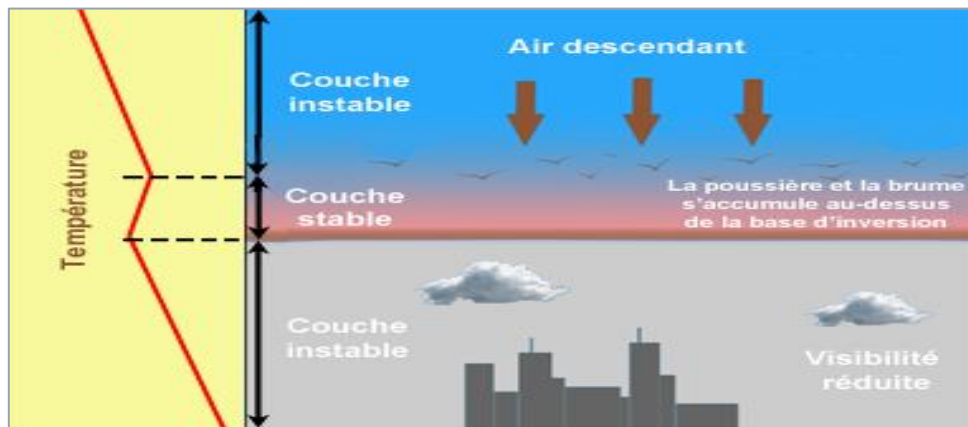


Figure 10. Inversion de température par subsidence.

**L'inversion de température par advection :** Cette inversion thermique se produit lorsque l'air chaud et humide (océan) arrive sur le sol et se refroidit à sa base.

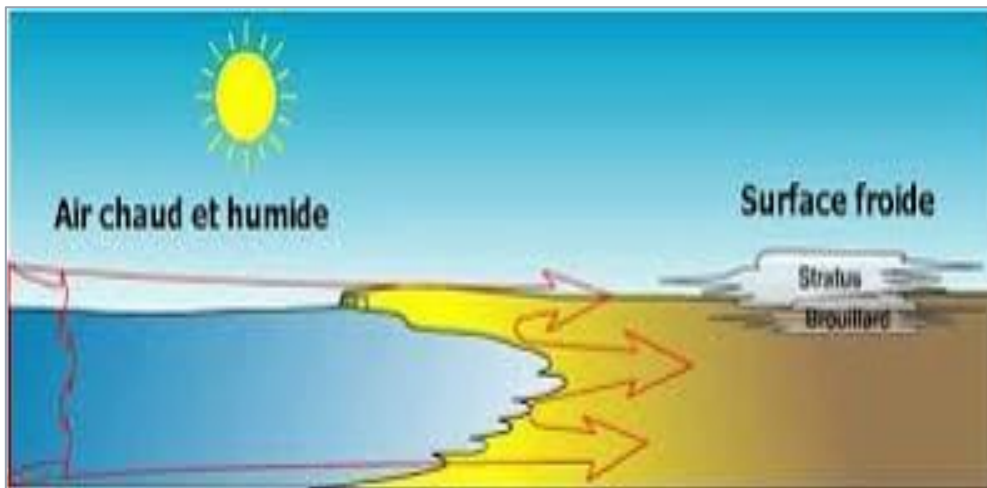


Figure 11. Inversion de température par advection.

**La décroissance de l'humidité avec l'altitude :** Dans ce cas on a une évaporation d'une surface humide (mer ou terre humide) dans l'air à la même température.

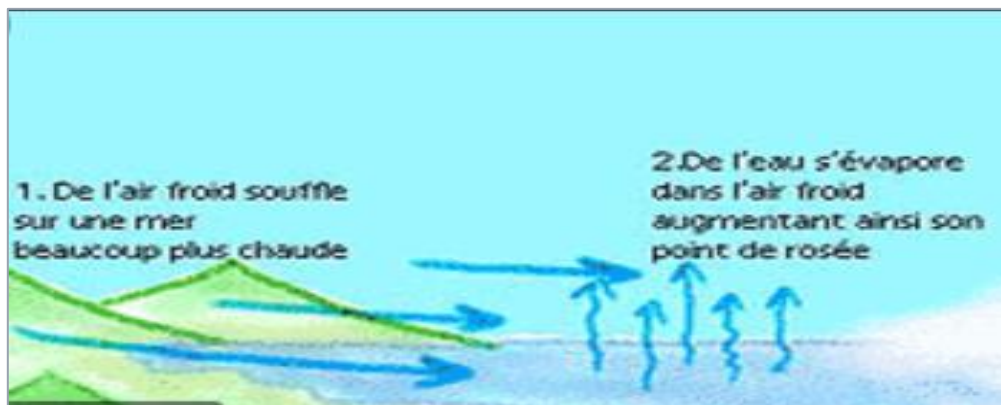


Figure 12. Evaporation d'une surface humide.

### II.3 L'impact sur la réception de la TNT

L'horizon radio d'un émetteur TNT est la limite théorique de sa portée en temps normal. Quand il y a des propagations exceptionnelles pour lesquelles un « guide d'onde troposphérique » se crée, la portée de l'émetteur est prolongée au-delà de son horizon radio. Cela peut perturber la réception de la TNT dans une zone géographique lointaine.

Les schémas ci-dessous illustrent la différence entre une situation normale et une situation de propagation exceptionnelle.

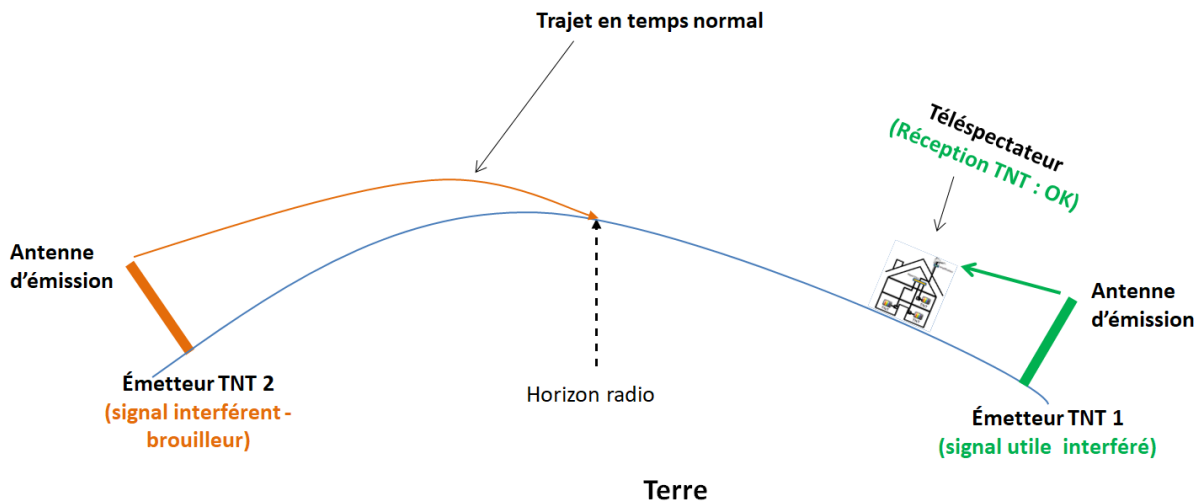


Figure 13. Situation normale

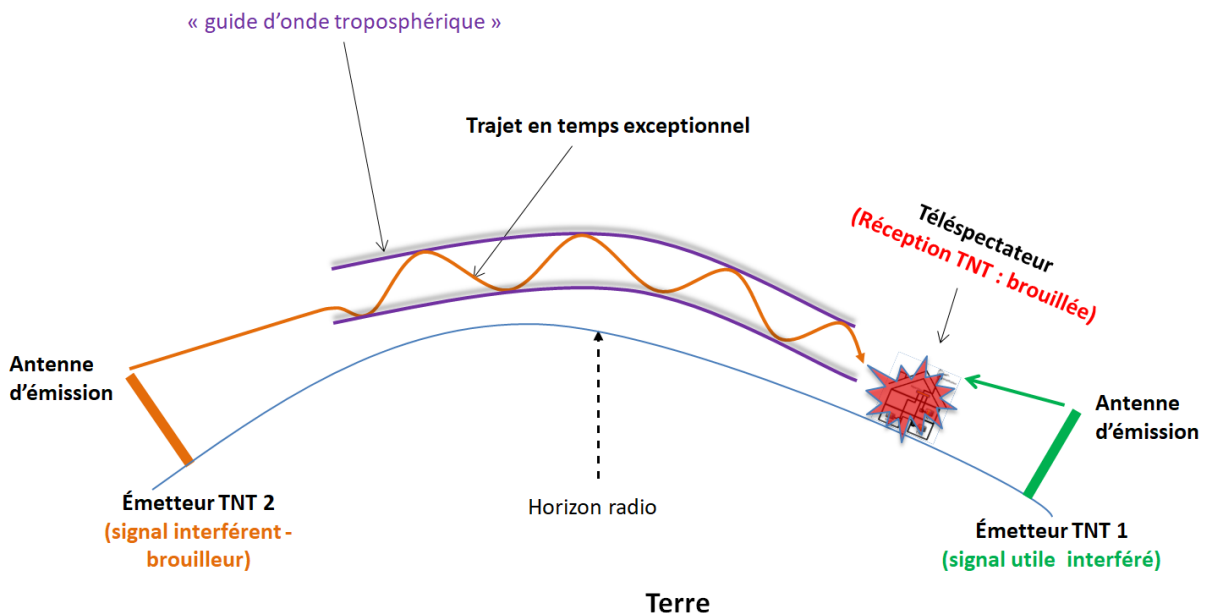


Figure 14. Situation de propagation exceptionnelle

## **PARTIE III. LA MODELISATION DU PHENOMENE**

### **III.1 Choix de méthode de modélisation**

Au terme de ce que nous avons vu précédemment, nous pouvons modéliser la propagation exceptionnelle des ondes de deux manières.

#### **1ère méthode : Modélisation par l'équation des ondes**

Pour la modélisation des effets du guide d'onde de façon déterministe, la modélisation la plus communément utilisée est liée à la résolution de l'équation d'Helmholtz qui est une équation aux dérivées partielles qui apparaît lorsque l'on cherche des solutions stationnaires de l'équation de propagation des ondes :

$$\Delta \Phi + k^2 n^2 \Phi = 0 \quad (22)$$

Pour simplifier nous allons nous mettre en 2D c'est à dire considérer la distance  $x$  et l'altitude  $z$ .

$$\frac{\partial^2 \Phi(x,z)}{(\partial x)^2} + \frac{\partial^2 \Phi(x,z)}{(\partial z)^2} + k^2 n(x,z)^2 \Phi(x,z) = 0 \quad (23)$$

Dans ce cas, la fonction  $\Phi(x,z)$  représente une des composantes transverses du champ électrique ou magnétique de polarisation respective horizontale ou verticale. Et le paramètre  $n(x,z)$  représente quant à lui l'indice de réfraction fonction de la distance et de l'altitude.

D'après le cours sur les équations aux dérivées partielles vu en deuxième année de la formation MACS, l'équation différentielle du second ordre ci-dessus est une équation elliptique car son discriminant  $\Delta = -4 < 0$ .

En effet, d'une manière générale, on a :  $a \frac{\partial^2 u}{(\partial x)^2} + b \frac{\partial^2 u}{(\partial x \partial y)} + c \frac{\partial^2 u}{(\partial y)^2} + d \frac{\partial u}{(\partial x)} + e \frac{\partial u}{(\partial y)} + fu = g$  (24)

En identifiant (24), et en posant  $y = z$ , on obtient :  $a = c = 1$ ,  $b = d = e = g = 0$ ,  $f = k^2 n(x,z)^2$

Et donc :  $\Delta = 0^2 - 4 * 1 * 1 = -4 < 0$ .

L'approximation parabolique (ou paraxiale) de l'équation des ondes est (après suppression de la dépendance temporelle) :

$$\frac{\partial^2 u}{(\partial z)^2} + 2ik \frac{\partial u}{(\partial x)} + k^2 \left( n^2 - 1 + \frac{2z}{a_e} \right) u = 0 \quad (25)$$

Où  $u = \exp(-ikx)\Phi(x,z)$  est une fonction réduite qui suppose une variation lente en fonction de la distance ( $x$ ),  $a_e$  est le rayon de la terre ( $a_e = 6371 \text{ Km}$ ),  $k$  est le nombre d'onde et  $i^2 = -1$ .

Cette dernière équation aux dérivées partielles est une EDP parabolique. En effectuant un développement de Taylor, on montre qu'elle est d'ordre 2.

L'approximation parabolique (ou para-axiale) de l'équation des ondes considère uniquement les propagations vers l'avant (et néglige donc la réflexion des champs). De plus, il est important de préciser que sa précision se limite aux directions de propagation qui sont très proches de l'horizon.

Toutefois, les ondes réfléchies peuvent être modélisées en tenant compte des réflexions sur des éléments diffractant issues de l'incorporation des effets de terrain. L'approximation parabolique convertit donc le problème de propagation en un problème aux valeurs initiales qui eut être résolu par l'une des méthodes numériques pour la résolution des EDP vu en cours.

Cependant, ce modèle purement déterministe reste difficilement utilisable dans les études de compatibilités, car ils génèrent des résultats précis dans le cadre d'une unique configuration du système en longueur (terrain) et en hauteur (évolution de l'indice de réfraction). Autrement dit, si ce modèle, basé sur des lois fondamentales de la physique ondulatoire restent en totale adéquation avec les phénomènes observables ou mesurables, il ne peut en aucun cas se substituer à un modèle plus empiriques et/ou statistiques qui aura par nature tendance à prendre en considération les évolutions du système avec le temps.

Dans le cadre de notre projet stage, nous choisissons le modèle empirique basé sur les recommandations de l'Union Internationale des télécommunications.

## **2<sup>ème</sup> méthode : Modélisation par le gradient de co-indice N (la méthode retenue)**

Nous avons montré que la formule (19) du co-indice de réfraction N est donnée par :

$$N = 77.7 * \frac{P}{T} + 22813.8 * H * \exp\left(\frac{(T-273.15) * \left(\frac{3833.65-T}{234.5}\right)}{T-16}\right) / T^2$$

Cette expression dépend de la pression ( $P$ ), la température ( $T$ ) et l'humidité relative ( $H$ ). Ainsi il nous faut ces données météorologiques en fonction des altitudes  $z$ .

Une fois ces données météorologiques collectés, nous pouvons calculer les valeurs du gradient de co-indice de N ( $\frac{dN}{dz}$ ) et les projeter sur une carte géographique afin de visualiser les zones propices à un « guide d'onde troposphérique ».

Par ailleurs, l'Union Internationale des Télécommunication qui a indiqué que pour l'Europe continental la valeur de N au mois de février varie entre 310 et 320. En août il se situe plutôt vers 330. A titre de comparaison N se situe vers 390 en août vers les îles du Cap Vert.

## **III.2 Identification et choix d'un fournisseur des données météorologiques**

Nous allons présenter les principales sources des données météorologiques nécessaires pour le calcul du gradient  $\frac{dN}{dz}$ .

### **Source 1 : MétéoFrance**

MétéoFrance est établissement public administratif. Il est le service officiel de la météorologie et de la climatologie en France. À ce titre, il exerce les attributions de l'État en matière de sécurité météorologique des personnes et des biens.

MétéoFrance propose deux modèles qui sont le modèle Arome et le modèle Arpège.

Le modèle Arome est un modèle qui fournit les données météorologiques de la France métropolitaine avec un maillage de 1.3 km x 1.3 km (ou 2.5 km x 2.5km).



Le modèle Arpège est un modèle qui fournit les données pour l'Europe et le monde entier. Les données du monde sont issues d'une résolution 56 km x 56 km et les données de l'Europe sont issues d'une résolution 13km x 13km.

Les données pour ces deux modèles sont gratuites sur le site de MétéoFrance et elles sont récupérables dans un fichier GRIB2. Le format ouvert GRIB est standardisé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) ce qui contribue opérationnellement à l'interopérabilité des systèmes d'information météorologique. Le format GRIB édition 2 (GRIB2) est un des formats préconisés par la directive européenne inspiré pour les données maillées de conditions atmosphériques.

Des logiciels libres tels que Xygrib, Zygrib permettent de visualiser les données de fichier GRIB / GRIB2.

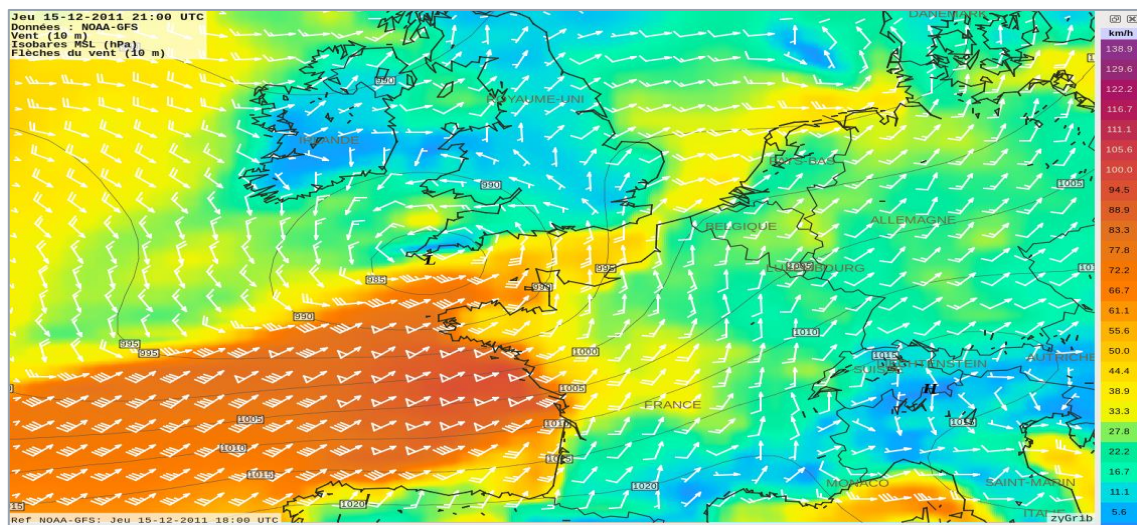


Figure 15. Exemple d'affichage d'un fichier GRIB sous ZyGrib : Tempête du 15/12/2011 (Source NOAA, modèle GFS)

Cependant, les logiciels Zygrib et xygrib ne permettent pas d'extraire des données en masse.

A ce jour, nous sommes incapables de récupérer les données depuis un fichier GRIB / GRIB2. Nous mettons donc cette source de MétéoFrance en stand-by.

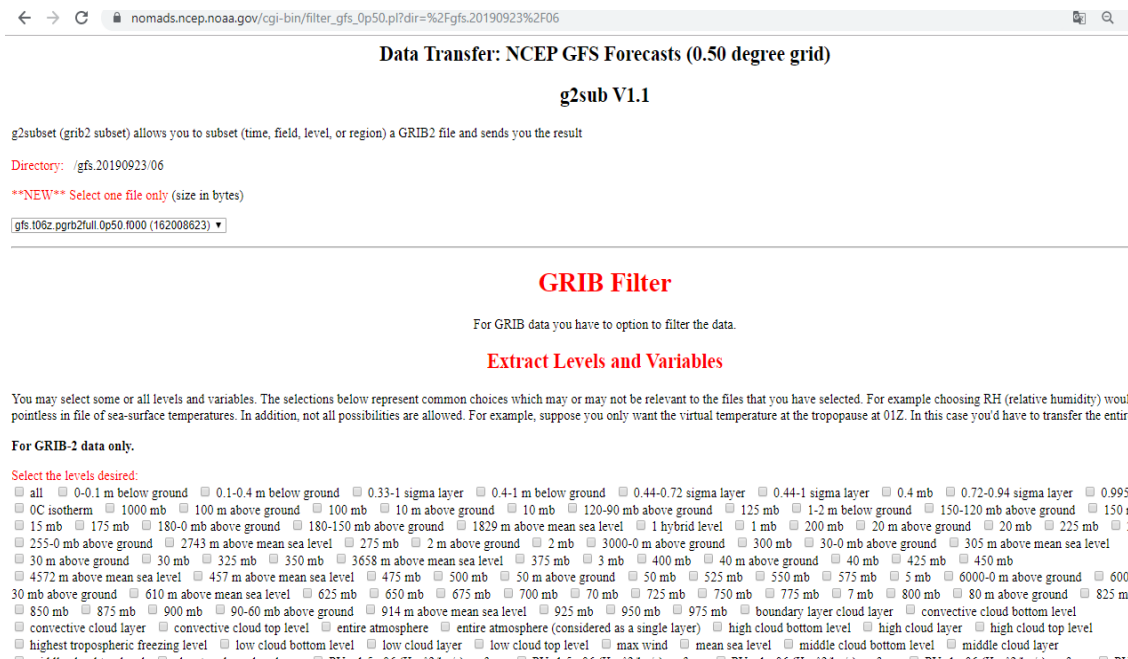
### **Source 2 : NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (la source retenue)**

La NOAA est l'agence américaine responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère. La NOAA propose sur son site internet le modèle GFS pour le monde avec 3 différentes résolutions :

- La résolution 28 km x 28 km : Les données prévisionnelles météorologiques  $P$ ,  $T$  et  $H$  sont disponibles pour 12 altitudes  $z$ . Les données en prévision vont de J-8 à J+16 et sont gratuites. Les données prévisionnelles sont réactualisées toutes les 6h par pas de 1h.
- La résolution 56 km x 56 km : Les données météorologiques  $P$ ,  $T$  et  $H$  sont disponibles pour 29 altitudes  $z$ . Les données vont de J-8 à J+16 et elles sont gratuites. Elles sont réactualisées toutes les 6h avec un pas de 1h.
- La résolution 112 km x 112 km : Puisque le maillage avec cette résolution est moins fin, nous n'avons pas approfondi notre étude sur celui-ci pendant le stage.

Un avantage de la source NOAA est la possibilité de télécharger des données météorologiques sous plusieurs formats : GRIB2, CSV et dataframe (tableau) sous le langage de développement R.

Cela nous permet d'extraire des données météorologiques en masse. C'est la raison pour laquelle que nous choisissons cette source de NOAA pour notre stage.



← → ↺ nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter\_gfs\_0p50.pl?dir=%2Fgfs.20190923%2F06

**Data Transfer: NCEP GFS Forecasts (0.50 degree grid)**

**g2sub V1.1**

g2subset (grib2 subset) allows you to subset (time, field, level, or region) a GRIB2 file and sends you the result

Directory: /gfs.20190923/06

**\*\*NEW\*\* Select one file only (size in bytes)**

gfs.t06z.pgrb2full.0p50.t000 (162008623) ▾

---

**GRIB Filter**

For GRIB data you have to option to filter the data.

**Extract Levels and Variables**

You may select some or all levels and variables. The selections below represent common choices which may or may not be relevant to the files that you have selected. For example choosing RH (relative humidity) would pointless in file of sea-surface temperatures. In addition, not all possibilities are allowed. For example, suppose you only want the virtual temperature at the tropopause at 01Z. In this case you'd have to transfer the entire

**For GRIB-2 data only.**

Select the levels desired:

☐ all ☐ 0-0.1 m below ground ☐ 0.1-0.4 m below ground ☐ 0.33-1 sigma layer ☐ 0.4-1 m below ground ☐ 0.44-0.72 sigma layer ☐ 0.44-1 sigma layer ☐ 0.4 mb ☐ 0.72-0.94 sigma layer ☐ 0.995 mb ☐ 0C isotherm ☐ 1000 mb ☐ 100 m above ground ☐ 100 mb ☐ 10 m above ground ☐ 10 mb ☐ 120-90 mb above ground ☐ 125 mb ☐ 1-2 m below ground ☐ 150-120 mb above ground ☐ 150 m ☐ 15 mb ☐ 175 mb ☐ 180-0 mb above ground ☐ 180-150 mb above ground ☐ 1829 m above mean sea level ☐ 1 hybrid level ☐ 1 mb ☐ 200 mb ☐ 20 m above ground ☐ 20 mb ☐ 225 mb ☐ 255-0 mb above ground ☐ 2743 m above mean sea level ☐ 275 mb ☐ 2 m above ground ☐ 2 mb ☐ 3000-0 m above ground ☐ 300 mb ☐ 30-0 mb above ground ☐ 305 m above mean sea level ☐ 30 m above ground ☐ 30 mb ☐ 325 mb ☐ 350 mb ☐ 3658 m above mean sea level ☐ 375 mb ☐ 3 mb ☐ 400 mb ☐ 40 m above ground ☐ 40 mb ☐ 425 mb ☐ 450 mb ☐ 4572 m above mean sea level ☐ 457 m above mean sea level ☐ 475 mb ☐ 500 mb ☐ 50 m above ground ☐ 50 mb ☐ 525 mb ☐ 550 mb ☐ 575 mb ☐ 5 mb ☐ 6000-0 m above ground ☐ 600 mb ☐ 610 m above mean sea level ☐ 625 mb ☐ 650 mb ☐ 675 mb ☐ 700 mb ☐ 70 mb ☐ 725 mb ☐ 750 mb ☐ 775 mb ☐ 7 mb ☐ 800 mb ☐ 80 m above ground ☐ 825 mb ☐ 850 mb ☐ 875 mb ☐ 900 mb ☐ 90-60 mb above ground ☐ 914 m above mean sea level ☐ 925 mb ☐ 950 mb ☐ 975 mb ☐ boundary layer cloud layer ☐ convective cloud bottom level ☐ convective cloud layer ☐ convective cloud top level ☐ entire atmosphere ☐ entire atmosphere (considered as a single layer) ☐ high cloud bottom level ☐ high cloud layer ☐ high cloud top level ☐ highest tropospheric freezing level ☐ low cloud bottom level ☐ low cloud layer ☐ low cloud top level ☐ max wind ☐ mean sea level ☐ middle cloud bottom level ☐ middle cloud layer

Figure 16. Le site de la NOAA

### III.3 L'automatisation de la collecte et du traitement des données météorologiques

#### Choix et présentation du langage R

Afin de mettre en place l'automatisation des données météorologiques nous avons faire le choix du langage de programmation R pour les quelques raisons suivantes :

- Le package R-Nomads de la NOAA facilite l'accès aux données météorologiques fournies par la NOAA.
- R est un logiciel destiné aux traitements de données et l'analyse statistique créé par Ross Ihaka & Robert Gentleman en 1997
- R est un logiciel libre et open source
- R est utilisable sous Windows

L'algorithme de collecte des données météorologiques a été développé sous RStudio qui est un environnement de développement gratuit, libre et multiplateforme pour R. RStudio a été écrit en langage C++. Son interface se présente sous la forme d'une unique fenêtre découpée en quatre zones que l'on peut redimensionner, masquer ou maximiser selon ses préférences.



Une zone permet l'édition de fichiers source R et une autre affiche la console avec la session R en cours d'exécution. L'utilisation du raccourci « ctrl+entrée » permet d'exécuter directement une ligne ou une sélection depuis le fichier source.

Une troisième zone permet de basculer entre l'affichage des objets de l'espace de travail actuel (Workspace) et l'historique des commandes exécutées. On peut même inspecter visuellement le contenu de certains objets.

Enfin, une quatrième zone permet de basculer entre :

- Un navigateur de fichiers
- La fenêtre d'affichage et d'export des graphiques
- Une liste des extensions installées, qui permet de les charger en mémoire ou d'en installer de nouvelles.
- Un navigateur d'aide qui permet à la fois la navigation dans l'aide en ligne intégrée à R et l'affichage des pages d'aide des différentes fonctions.

La figure suivante illustre une représentation de R-Studio :

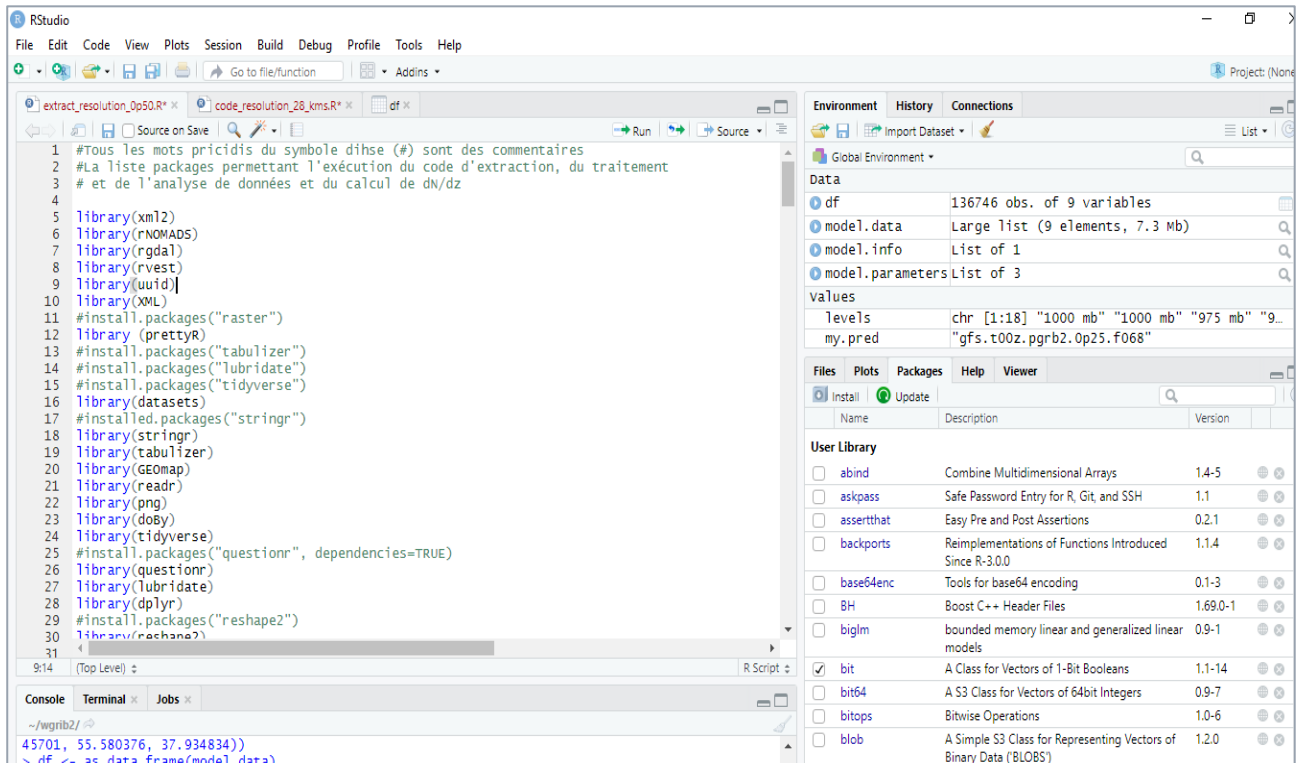


Figure 17. Présentation de R-studio sous Windows

## Paramètres d'entrées

Pour pouvoir faire tourner le code de développement, accéder et traiter les données l'installation et/ou l'appel de plusieurs packages de R est indispensable.

Dans le code développé, plusieurs paramètres d'entrées peuvent être saisis à savoir : la date de début et de fin de prévisions que l'on désire, le nombre d'instantanés de prévisions, la zone géographique que l'on désire extraire (choix de découpe), les altitudes, la résolution.

Pour notre projet nous avons choisi les découpes sur la figure 17.

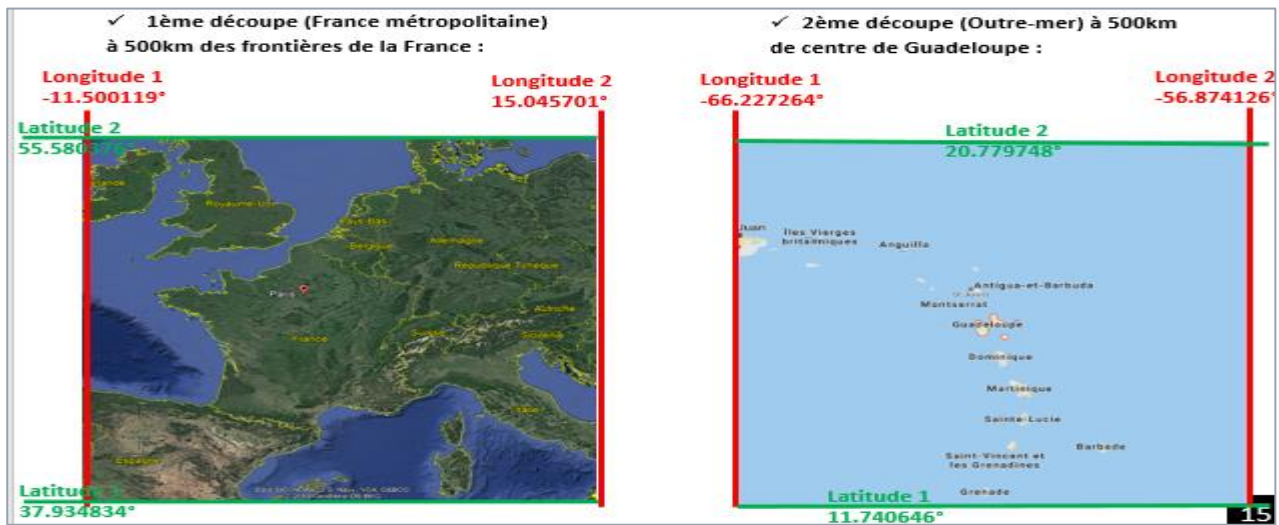


Figure 18. Les écoups géographiques retenues

**Collecte, analyse et traitement des données**

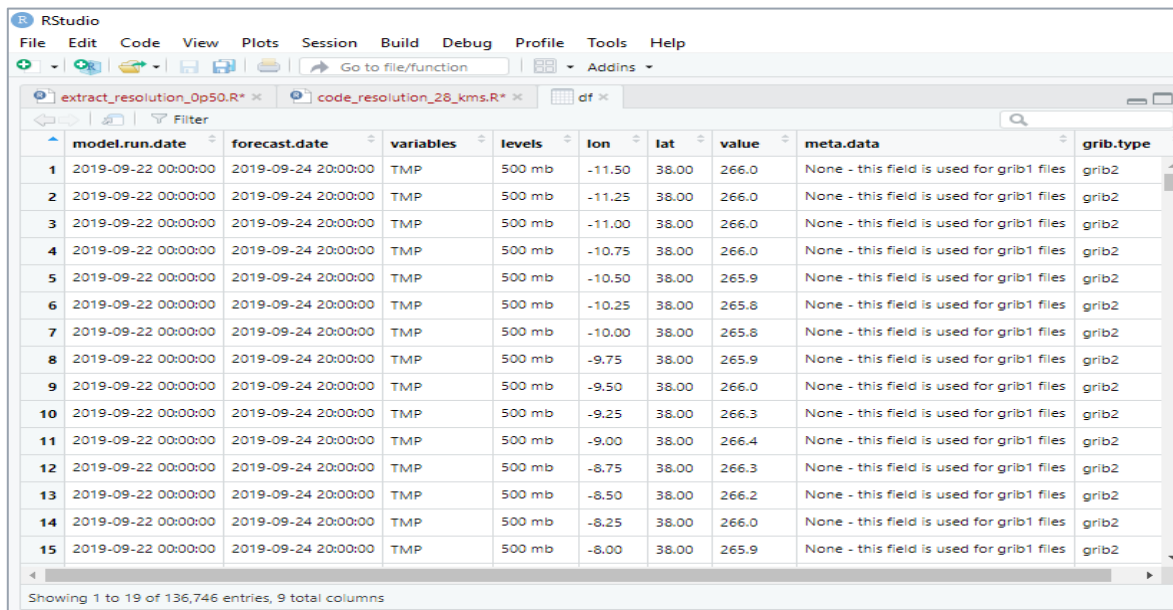
Une fois le code pour l'extraction fait, les données météorologiques sont extraites et placés dans un tableau appelé « dataframe » en langage R.

En effet, le type `data.frame` est un type spécifique dédié à la manipulation d'ensemble de données de type « individus x variables » (lignes x colonnes).

On peut le voir comme une liste de vecteurs de même longueur (numérique, factor, etc.). Avec des fonctionnalités spécifiques.

On peut aussi le voir comme une matrice. Cette spécificité peut être exploitée intensivement lorsqu'il s'agit d'accéder aux valeurs.

Le « dataframe » des données météorologiques comprend 9 colonnes dont la date à laquelle le model a été mis en ligne sur le site de la NOAA, la date de prévision, la meta.data, les variables, les pressions, la longitude, la latitude et le type de GRIB.



	model.run.date	forecast.date	variables	levels	lon	lat	value	meta.data	grib.type
1	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-11.50	38.00	266.0	None - this field is used for grib1 files	grib2
2	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-11.25	38.00	266.0	None - this field is used for grib1 files	grib2
3	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-11.00	38.00	266.0	None - this field is used for grib1 files	grib2
4	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-10.75	38.00	266.0	None - this field is used for grib1 files	grib2
5	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-10.50	38.00	265.9	None - this field is used for grib1 files	grib2
6	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-10.25	38.00	265.8	None - this field is used for grib1 files	grib2
7	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-10.00	38.00	265.8	None - this field is used for grib1 files	grib2
8	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-9.75	38.00	265.9	None - this field is used for grib1 files	grib2
9	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-9.50	38.00	266.0	None - this field is used for grib1 files	grib2
10	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-9.25	38.00	266.3	None - this field is used for grib1 files	grib2
11	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-9.00	38.00	266.4	None - this field is used for grib1 files	grib2
12	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-8.75	38.00	266.3	None - this field is used for grib1 files	grib2
13	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-8.50	38.00	266.2	None - this field is used for grib1 files	grib2
14	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-8.25	38.00	266.0	None - this field is used for grib1 files	grib2
15	2019-09-22 00:00:00	2019-09-24 20:00:00	TMP	500 mb	-8.00	38.00	265.9	None - this field is used for grib1 files	grib2

Figure 19. Le « dataframe » de données météorologiques

Si le nombre des colonnes (variables) des « dataframe » des données météorologiques reste identique, le nombre de lignes (observations) des « dataframe » dépend de la résolution et du type de données.

Pour la résolution 28 km x 28 km, le « dataframe » des données prévisionnelles d'un seul instant comprend 7 597 points géographiques et 182 328 lignes pour notre découpe sur la France métropolitaine et donc pour notre prévision de 30 instants nous avons 5 469 840 lignes

Pour la résolution 56 km x 56 km, le « dataframe » des données prévisionnelles d'un seul instant comprend 1944 points géographiques et 73 872 lignes et donc pour notre prévision de 30 instants nous avons 2 216 160 lignes.

Pour les données d'archives avec la résolution 28 km x 28 km, les données sont fournies avec une découpe mondiale. Ainsi le dataframe d'un seul instant comprend plus d'un million de lignes.

Les données récupérées doivent être analysées avant de passer à son utilisation.

R étant dédié aux statistiques et à la des sciences des données, il est judicieux de faire notre analyse sous son interface R-Studio.

Plusieurs fonctions permettant l'analyse des données qualitatives et quantitatives existent sous R.

Parmi celles-ci, nous pouvons citer les fonctions :

- View() : permet de parcourir un jeu de données
- Summary() : permet de synthétiser un jeu de données en donnant : le min, max, la moyenne, les 3 quartiles Q (Q1, Q2 = médiane, Q3) de chaque variables quantitatives
- str() : permet de vérifier le type de variable
- attach() permet de travailler avec un « dataframe » particulier
- dim() : affiche le nombre d'individus et le nombre de variables
- ncol() : affiche le nombre de colonnes
- nrow() : affiche le nombre de lignes

- `dimnames()` : affiche le nom des lignes et des colonnes
- `rownames()` : affiche le nom des lignes (observations)
- `colnames()` : affiche le nom des colonnes (variables)
- `head()` : affiche les premières lignes
- `tail()` : affiche les dernières lignes
- `transform()` : applique une transformation sur une colonne
- `filter()` : permet de filtrer la table en fonction d'une condition logique

Pour avoir des informations sur les objets on peut faire :

- `is.data.frame(df)`: renvoie TRUE si l'objet df est un dataframe et FALSE sinon
- `is.complex(df)`: renvoie TRUE si l'objet df est un complexe et FALSE sinon
- `is.character(df)` : renvoie TRUE si l'objet df est une chaîne de caractère et FALSE sinon
- `is.numeric(df)` : renvoie TRUE si l'objet df est numérique et FALSE sinon
- `is.factor(df)` : renvoie TRUE si l'objet df est un factor et FALSE sinon

Plusieurs fonctions ne pourront être évaluées en présence de valeurs aberrantes ou manquantes, désignées par NA (Not Available) dans R.

Pour gérer les valeurs manquantes et aberrantes on peut utiliser :

- `is.na()` : indique les valeurs manquantes
- `complete.cases()` : indique les lignes d'un data frame (individus) n'ayant aucune valeur manquante
- `na.omit()` : enlève les individus avec au moins une valeur manquante

Une bonne idée est de remplacer les valeurs aberrantes par la moyenne et l'utiliser pour faire notre calcul.

On ne peut continuer l'analyse des données sans faire de représentations graphique.

Parmi les représentations graphiques, le diagramme en boîte à moustache (box-plot en anglais) est très efficace car celui-ci permet d'examiner les éléments d'un « dataframe » pour en savoir plus sur le centrage et la dispersion des données d'échantillon.

La fonction utilisée pour avoir la boîte à moustache est la fonction `boxplot()`.

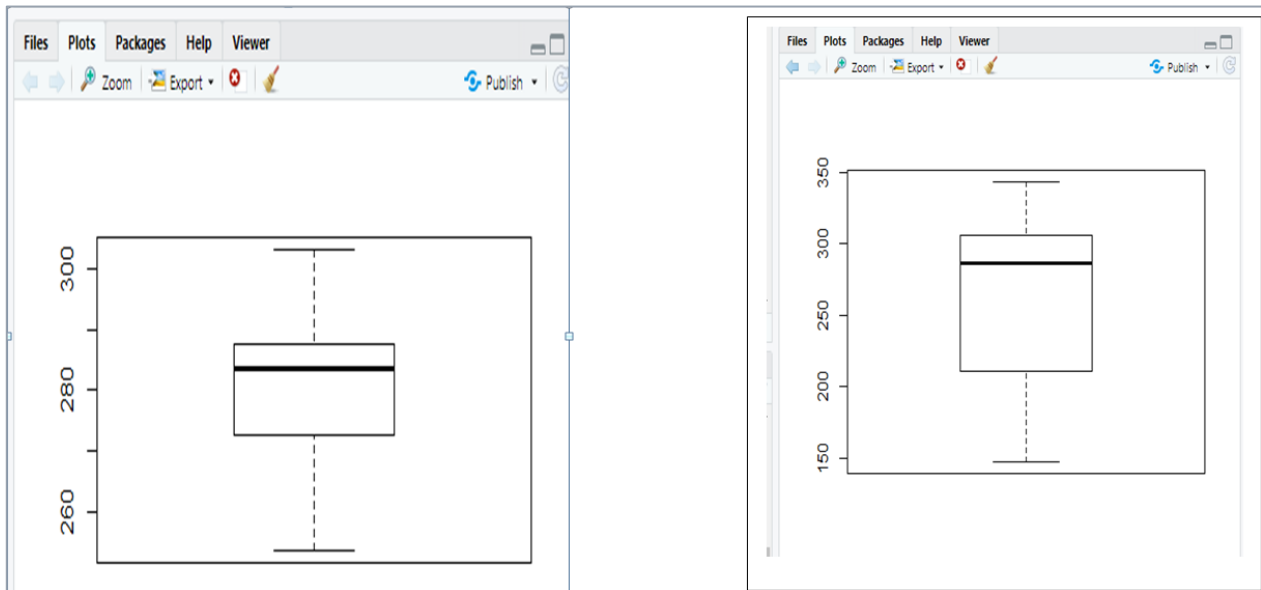


Figure 20. (de gauche à droite) Répartition des températures et des co-indices via une boîte à moustache.

Cette boîte à moustache s'interprète comme suit :

- La ligne en <<gras>> dans la boîte représente la médiane.

Pour rappel, la médiane est une mesure courante du centrage des données. La moitié observations lui sont inférieures ou égales et la moitié des observations lui sont supérieures ou égales. La boîte à moustaches de la figure 16 indique que la médiane vaut 290.

- La boîte de l'étendue interquartile représente la moitié centrale (50 %) des données. Elle indique la distance entre les premier et troisième quartiles ( $Q1 - Q3$ ).

Pour rappel, le premier quartile notée  $Q1$  est telle qu'au moins 25 % des valeurs de la série statistique lui sont inférieures ou égales. Le troisième quartile ( $Q3$ ) est tel que au moins 75% des valeurs de la série statistique lui sont inférieures ou égales.

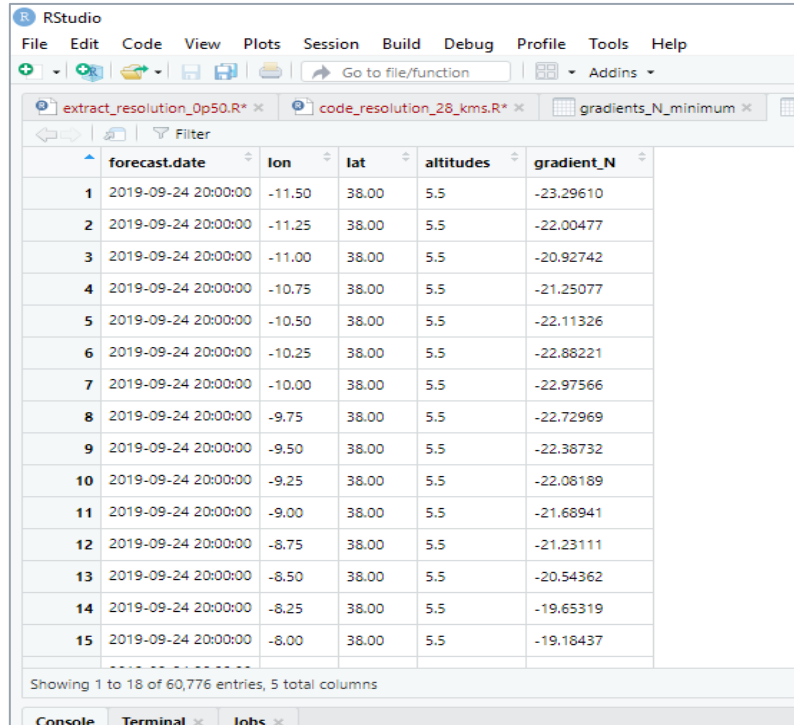
- Les moustaches s'étendent des deux côtés de la boîte. Elles représentent les plages des 25 % inférieurs et des 25 % supérieurs des valeurs de données, à l'exclusion des valeurs aberrantes. Sur une boîte à moustaches, les valeurs aberrantes sont indiquées par des astérisques (\*).

En fait, la boîte à moustaches des températures (figure à gauche) indique que la température médiane est de 71 pour les données prévisionnelles extraites. La température de la plupart des points géographiques choisis est située entre 271 et 288, mais la température de certains points peut baisser jusqu'à 253 ou atteindre 305. Ici il n'y a pas de valeurs aberrantes.

Quant à la boîte à moustaches des co-indices de réfraction N (figure à droite) indique que le co-indice de réfraction N médiane est 280 pour les données prévisionnelles extraites. Le co-indice N pour la plupart des points géographiques choisis est situé entre 220 et 310, mais le co-indice N de certains points peut baisser jusqu'à 150 ou atteindre 340. Ici également il n'y a pas de valeurs aberrantes.

Après l'analyse des données, nous pouvons fournir le « dataframe » des gradients de co-indice  $N$ .

Ce « dataframe » est composé d'une colonne indiquant les dates de prévision, les longitudes des points géographiques, les latitudes des points géographiques, les altitudes correspondantes et les gradients de co-indice calculés.



	forecast.date	lon	lat	altitudes	gradient_N
1	2019-09-24 20:00:00	-11.50	38.00	5.5	-23.29610
2	2019-09-24 20:00:00	-11.25	38.00	5.5	-22.00477
3	2019-09-24 20:00:00	-11.00	38.00	5.5	-20.92742
4	2019-09-24 20:00:00	-10.75	38.00	5.5	-21.25077
5	2019-09-24 20:00:00	-10.50	38.00	5.5	-22.11326
6	2019-09-24 20:00:00	-10.25	38.00	5.5	-22.88221
7	2019-09-24 20:00:00	-10.00	38.00	5.5	-22.97566
8	2019-09-24 20:00:00	-9.75	38.00	5.5	-22.72969
9	2019-09-24 20:00:00	-9.50	38.00	5.5	-22.38732
10	2019-09-24 20:00:00	-9.25	38.00	5.5	-22.08189
11	2019-09-24 20:00:00	-9.00	38.00	5.5	-21.68941
12	2019-09-24 20:00:00	-8.75	38.00	5.5	-21.23111
13	2019-09-24 20:00:00	-8.50	38.00	5.5	-20.54362
14	2019-09-24 20:00:00	-8.25	38.00	5.5	-19.65319
15	2019-09-24 20:00:00	-8.00	38.00	5.5	-19.18437

Figure 21. Le « dataframe » avec les valeurs des gradients de co-indice  $N$

Un outil permettant la collecte et le traitement automatique des données a été développé.

La figure 21 montre le principe de fonctionnement de cet outil :

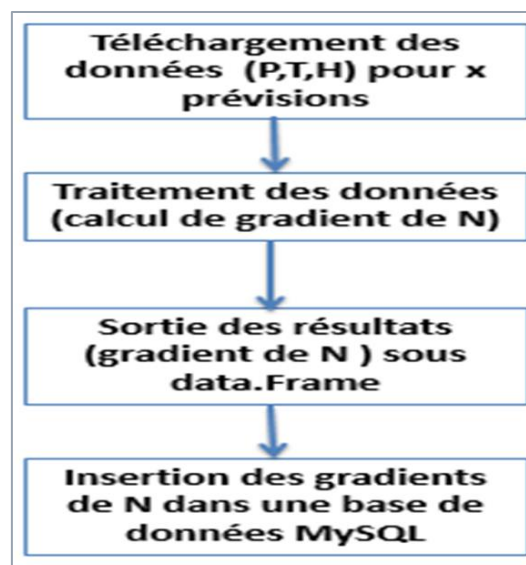


Figure 22. Les étapes de traitement des données météorologiques par l'automate.



Cet outil est relié à une interface d'utilisateur.

L'interface d'utilisateur donne la possibilité à l'utilisateur de prendre soit la moyenne des gradients en chaque point de coordonnées (x, y) où x est la longitude et y est la latitude pour les différentes altitudes, soit le minimum des gradients en chaque point de coordonnées (x, y). L'utilisateur peut également faire des filtres sur les altitudes.

### **III.4 Les premiers résultats**

Maintenant que nous avons réussi à faire sortir automatiquement les données utiles à la modélisation des épisodes de propagations exceptionnelles, nous pouvons les projeter sur une carte géographique.

Pour la projection sur la carte géographique nous avons défini une échelle avec la palette de couleur suivante.

Valeur de gradient de N	Couleur
< -157	rouge
-157 à -79	orange
-79 à 0	jaune
> 0	vert

Figure 23. La palette de couleur

Les figures suivantes permettent de visualiser nos premiers résultats.



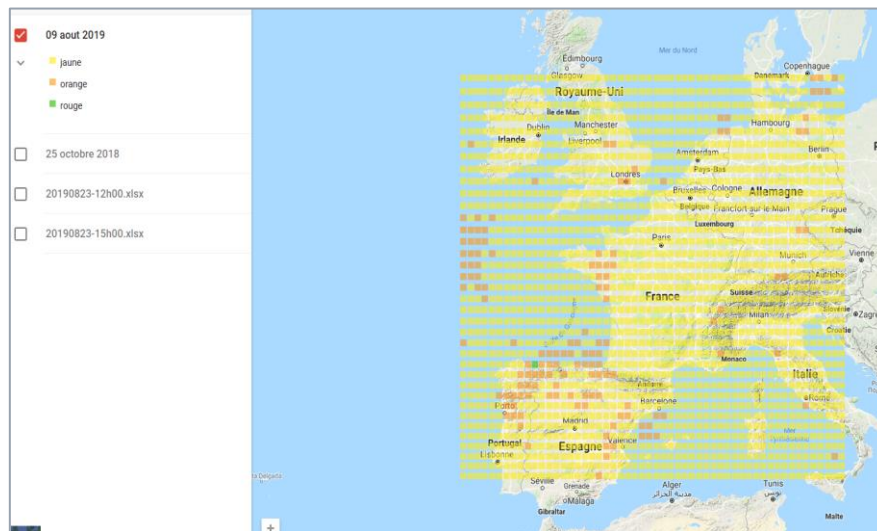


Figure 24. Prévion du 9 août à 12h : Résolution [56 km x 56 km x 29 altitudes]

Les données affichées sur la carte de la figure 24 sont issues d'un échantillonnage des données météorologiques au pas de 56 Km. Elles ont été extraites le 8 août à 15h.

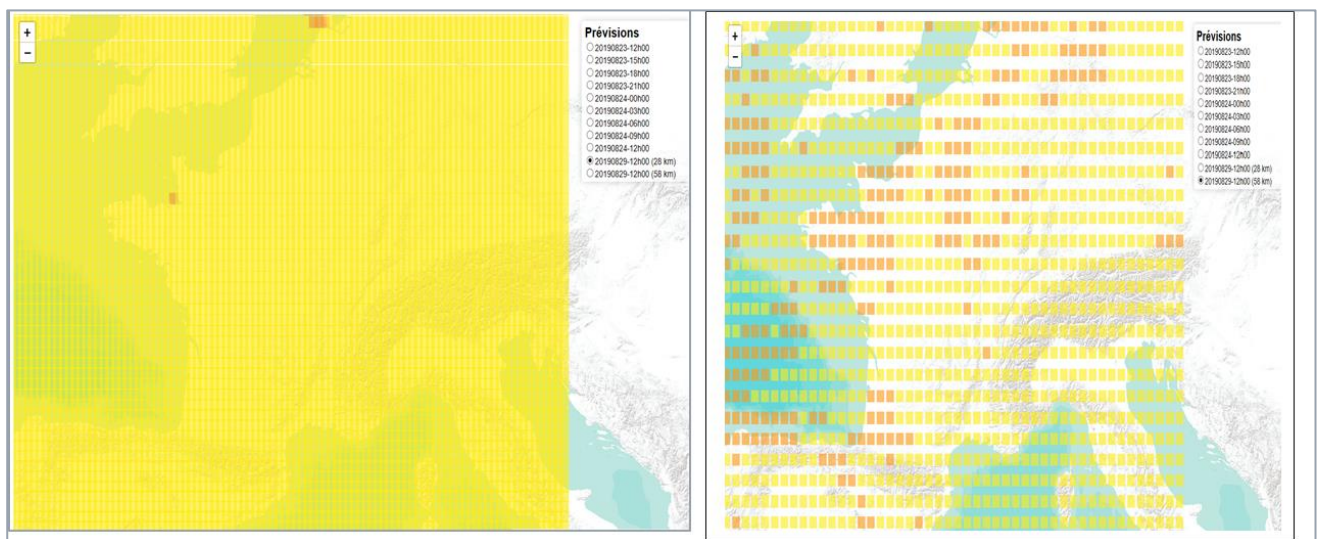


Figure 25. Prévion du 29 août à 12h : Résolutions [28 km x 28 km x 8 altitudes] & [56 km x 56 km x 29 altitudes]

Les données affichées sur la carte de la figure 25 sont issues d'un échantillonnage des données météorologiques au pas de 28 Km et d'un échantillonnage des données météorologiques au pas de 56 Km. Les données ont été extraites à la même date (28 août à 12h).

Comme le calcul de  $\frac{dN}{dz}$  avec la résolution au pas de 28 Km a été effectué sur 8 niveaux d'altitude, sa valeur est moins représentative qu'avec la résolution au pas de 56 Km qui en compte 28.

Notre modèle pourra être affiné par retour d'expérience avec, par exemple, la définition d'une nouvelle palette ou encore avec l'analyse et le traitement des données d'archives des périodes de précédentes propagations exceptionnelles notamment les données de la semaine 43 en 2018.

## **CONCLUSION**

Mon stage de six mois que j'ai passé à l'ANFR m'a permis de me faire une idée très concrète du fonctionnement d'une entreprise publique en particulier sur les activités de recherche et développement. De plus, cette nouvelle expérience professionnelle fut pour moi plus enrichissante que les précédentes car elle m'a permis pour la première fois d'exercer mes compétences techniques que j'ai acquises au cours de ma formation d'Ingénieur MACS mais aussi d'avoir le sentiment d'exercer un métier passionnant en lien avec la modélisation et l'analyse des données. Le phénomène de propagations exceptionnelles était également un sujet nouveau pour moi. Étant donné l'intérêt relativement récent porté à ce sujet par les médias, il était intéressant de pouvoir observer comment est perturbée la réception de la TNT et les outils utilisés.

Je suis persuadé que cette expérience va m'être particulièrement profitable en ce qui concerne mon avenir professionnel. En effet, tout au long de mon stage, j'ai entretenu des relations avec les différents métiers de l'entreprise : techniciens, ingénieurs, secrétaire.... mais aussi avec des fournisseurs et distributeurs. Ce fut très enrichissant tant professionnellement qu'humainement. Mes périodes en entreprise m'ont également permis de prendre la mesure de mes compétences. Les connaissances théoriques et les méthodes acquises au cours de mes trois années en MACS m'ont permis de réaliser les missions qui m'ont été confiées. Ce stage a aussi bien répondu à mes attentes puisqu'il m'a permis de participer activement et utilement au fonctionnement de l'entreprise. Fort de cette expérience, j'ai ainsi une vision et une opinion positive sur la vie au sein d'une entreprise de R&D.

## **BIBLIOGRAPHIE**

[1]. UIT- R P.310-9

[2] Birnbaum, G., Chatterjee, S. K. 1952. The Dielectric Constant of Water Vapour in the Microwave Region. J. App. Phys., 23: 220-223. Boudouris, G. 1963. On the Index of Refraction of Air, the Absorption and Dispersion of Centimetre Waves by Gases. J. of Res. of the Nat. Bureau of Standards – D. Radio Propagation, 67D(6): 631–684.

[3] Thayer, G. D. 1974. An Improved Equation for the Radio Refractive Index of Air. Radio Science, 9(10): 803-807.

[4] Owens, J. C. 1967. Optical Refractive Index of Air: Dependence on Pressure, Temperature and Composition. Applied Optics, 6(1): 51-59.

[5] Hill, R. J. 1996. Refractive Index of Atmospheric Gases. Chapter II.3.1.1 in: Dieminger-Hartmann-Leitinger (eds), The Upper Atmosphere, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 261-270.

[6] Liebe, H. J. 1996. Models for the Refractive Index of the Neutral Atmosphere at Frequencies Below 1000 GHz. Chapter II.3.1.2 in: Dieminger-Hartmann-Leitinger (eds.), The Upper Atmosphere–Data Analysis and Interpretation. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1996, 270-287.

[6] Liebe, H. J., Gimmestad, G. G., Hopponen, J. D. 1977. Atmospheric Oxygen Microwave Spectrum – Experiment versus Theory. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, AP-26(3): 327-335.

[7] Newell, A. C., Baird, R. C. 1965. Absolute Determination of Refractive Indices of Gases at 47.7 GHz. Journal of Applied Physics, 36(12): 3751-3759.

[8] Zhevakin, S. A., Naumov, A. P. 1967. Refraction of Millimetre and Submillimetre Radio Waves in the lower Atmosphere. Radio Engineering and Electronic Physics (translated and published by IEEE), 12(1): 885-894. Zhevakin, S. A., Naumov, A. P. 1967. Refraction of Millimetre and Submillimetre Radio Waves in the lower Atmosphere. Radio Engineering and Electronic Physics (translated and published by IEEE), 12(1): 885-894.

[9] Hartmann, G. K. 1993. The Determination of Tropospheric Conditions (especially H<sub>2</sub>O) Affecting the Accuracy of Position Measurements. In: Geophysical Monograph 73, IUGG Volume 13, Environmental Effects on Spacecraft Trajectories and Positioning), Am. Geophys. Union, 73-82.

[10], Leitinger, R. Hartmann, G. K. 1984. Range Errors due to Ionospheric and Tropospheric Effects for Signal Frequencies above 100 MHz. Bulletin Geodesique, 58: 109-136 Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. Journal of Applied Meteorology

[11] UIT – REC – P.453 – 13 – 2017.pdf

[12] Rueger, J. M. 2002. Refractive Index Formulae for Electronic Distance " Measurement with Radio and Millimetre Waves, Unisurv Report S-68, School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, UNSW SYDNEY NSW 2052, Australia, 1-52.

[13] : UIT-R P.834-7

[14] Rapport ANFR15 Phénomènes de propagation anormale VF. Auteur : Thibaut Caillet.

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01006035v1/document>

