# Prévisions de l'indice de réfraction dans les couches basses de la troposphère

## Application aux liaisons radioamateurs.

Pascal Grandjean F5LEN.

Article publié dans la revue Hyper de septembre 2015.

En physique des ondes, la réfraction désigne le fléchissement d'une onde (optique, acoustique, radioélectrique ou sismologique) à l'interface entre deux milieux de vitesses de phase différentes.

La lumière est déviée lorsqu'elle passe d'un milieu transparent à un autre (par exemple de l'air à l'eau, ou le contraire...).

C'est ce phénomène qu'on observe lorsque l'on regarde une paille dans un verre : celle-ci paraît brisée. Cette « fracture » apparente est à l'origine du mot « réfraction ».

La lumière est dite « réfractée » et la propriété qui caractérise les différents milieux transparents est la « réfringence ».

Pour le domaine des ondes radio qui nous intéresse, on sait que l'affaiblissement des ondes augmente brusquement au-delà de l'horizon radioélectrique. Au-delà de cette zone, on peut cependant continuer à recevoir des signaux jusqu'à de très grandes distances.

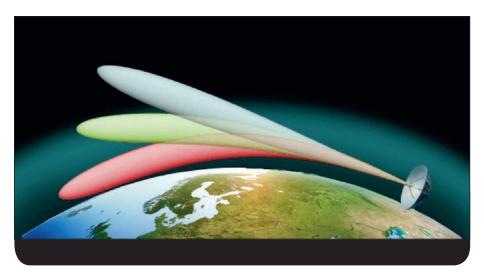
La variabilité des signaux reçus dans cette zone est influencée par l'irrégularité de l'indice de réfraction des couches les plus basses de la troposphère.

Cet indice de réfraction dépend des conditions thermodynamiques dans ces couches.

Comme un rayon lumineux est dévié lorsqu'il passe d'un milieu d'indice de réfraction n1 à un autre d'indice n2, une onde radio peut subir un changement de direction dépendant à la fois de sa fréquence et de la variation de l'indice de réfraction.

L'indice de réfraction de l'air dépend exclusivement de la température, de l'humidité et de la pression de la masse d'air.

Des recherches dans les années 60 menées notamment par B. R. Bean and J. D. Horn, ont permis d'établir un calcul de l'indice de réfraction de l'air noté *n*.



L'indice « normal » de réfraction de l'air *n*. est très proche de 1,0003.

Comme cet indice n ne varie que de quelques unités de l'ordre de 10-4 on le transformera en un indice N sans unité qui se calcule comme suit (ITU-R P.453-6):

$$N = (n-1)10^{6} = \frac{77.6}{T(P + 4810\frac{e}{T})}$$

où:

P est la pression atmosphérique en hPa

T la température en Kelvins

e la pression partielle de vapeur d'eau en hPa

L'équation de N contient donc deux termes. Le terme dit sec qui est :

$$Nsec = 77, \mathbf{6} * \frac{P}{T}$$

Et le second terme dit humide correspondant à :

$$Nhum = 3.732 * 10^5 * \frac{e}{T^2}$$

Le terme humide représente la plus grande part de la variation de N.

Cette méthode de calcul est valable jusqu'à 100 GHz avec une erreur inférieure à 0,5 % d'après l'ITU.

J'arrête ici les rappels physiques.

Si l'on veut déterminer les conditions nécessaires à l'émergence d'une propagation extraordinaire (pour les radioamateurs c'est plutôt synonyme de distances extraordinaires), il est nécessaire de définir un indice N pour des conditions standard.

Cet indice N dépend du lieu et de la saison. Pour cette raison, l'ITU a publié des cartes permettant de connaître cet indice en fonction de la situation géographique et du moment de l'année. Pour l'Europe continentale N au mois de février est compris 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.

Nous avons vu que le parcours d'une onde est influencé quand celle-ci passe d'un milieu d'indice de réfraction N1 à un milieu d'indice N2. Si le milieu était parfaitement homogène, il n'y aurait aucune influence sur le parcours. Il faut donc connaître l'évolution de N dans les différentes couches, c'est-à-dire en fonction de la hauteur. L'évolution de N en fonction de l'altitude est décroissante quasi exponentiellement.

Cependant, sur les premiers kilomètres, ce gradient peut être assimilé à une droite. TECHNIQUE n° 896 • Mars 2016

La pente de cette droite pour l'Europe est d'environ -40 par km.

Par des calculs géométriques que je ne développerai pas ici, on montre que si ce gradient atteint une décroissance de -157 par km, alors la réfraction est telle que le faisceau suit parfaitement la courbure moyenne du globe terrestre. Dans ces conditions, une onde pourrait théoriquement parcourir une distance infinie. C'est ce qu'on nomme en anglais un « duct » ou « conduit » en français.

À l'inverse, si cette décroissance est inférieure à -40/km, alors on quitte aussi le domaine de réfraction normale pour passer à une sous-réfraction. Dans ces conditions le trajet de l'onde sera également affecté mais de façon négative. Le faisceau, au lieu d'être « cintré » vers le sol, aura tendance à être déformé vers le ciel, réduisant d'autant la distance.

Donc, si on connaît la température, la pression, l'hygrométrie d'une masse d'air à une hauteur donnée, on peut donc aisément calculer son indice de réfraction N. On peut faire ce même calcul à différentes hauteurs et en déduire le gradient de N. Alors on peut indiquer sur une carte les zones où ce gradient montre une tendance propice à l'apparition possible d'une propagation favorable ou pas.

On peut donc établir des cartes de prévisions de la même façon que les cartes que l'on retrouve au bulletin météo des journaux (la jolie présentatrice en moins).

Voir cartes sur: http://tropo.f5len.org

Les données nécessaires (température, pression, °rh) sont produites généralement 4 fois par jour par les organismes météo des différents pays. Ces données sont les sorties brutes des modèles météo que chaque organisme météo a concocté au cours de longues années. Des fichiers de données sont disponibles sur internet à la NOAA américaine depuis longtemps.

C'est ce modèle que j'utilise depuis deux ans et qui est exploité par un autre site de prévision troposphérique bien connu (1).

Depuis juillet 2015, les données produites par Météo France sont également disponibles en libre accès.

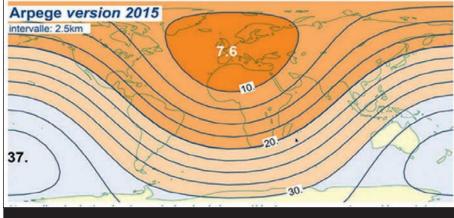


Figure 1 : Nouvelle résolution horizontale (en km) du modèle Arpège en version « déterministe »

Au sein d'un fichier dit de « grille » on trouve pour chaque point du globe ces grandeurs physiques prévues pour les 102 ou 240 prochaines heures selon les modèles et ce, 4 fois par jour. Pour chaque « run » généralement à 00h, 06h, 12h, et 18h UTC on obtient un ou des fichiers de plusieurs centaines de Mo à traiter pour obtenir une carte. (Les fichiers de données sont en fait disponibles sur internet plusieurs heures après l'heure de leur calcul).

Pour réaliser ces cartes, j'utilise un logiciel tournant sous Linux nommé GRADS (GRid Analysis and Display System) développé par le

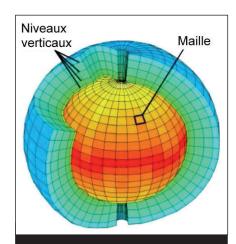


Figure 2 : Principe du découpage en mailles et en niveaux (données Arpège)

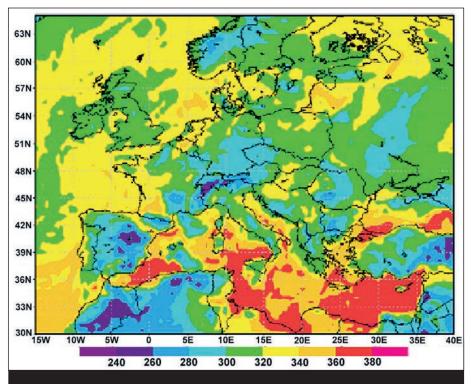


Figure 3 : Indice N à 250 m asl le 7 août 2015 à 06 UTC

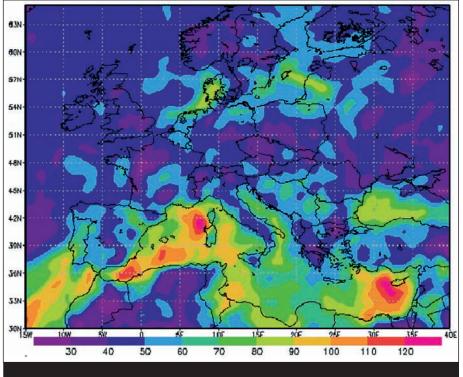


Figure 4: Moyenne des gradients (normale -40/km)

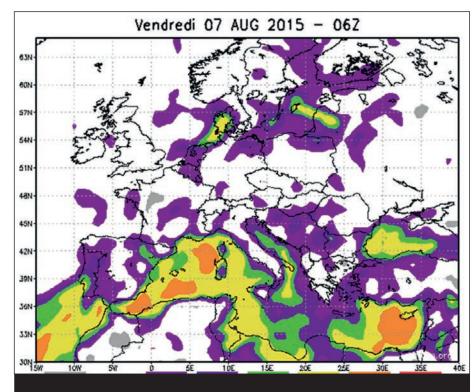


Figure 5 : Moyenne de l'indice de réfraction entre 20 m et 1000 m asl

Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA).

Ce logiciel permet de manipuler les données en grille et d'afficher des cartes mais aussi des courbes.

Le modèle GFS pour Global Forecast System (GFS) du National Climatic Data Center contient des centaines de données pour une couverture globale du globe.

La résolution horizontale que j'utilise est de 18 miles, soit environ 30 km. Les données s'étagent sur 64 niveaux. Les niveaux ne sont pas directement des altitudes mais

des niveaux de pressions allant de 1000 hPa à 10 hPa.

Pour simplifier, du sol à une altitude de 30 km. Pour le domaine qui nous intéresse, les niveaux significatifs sont au nombre de 6 : 1000, 975, 950, 925, 900 et 850 hPa (de la surface du sol à environ 1500 m asl).

Pour le modèle ARPEGE de Météo France, on peut accéder directement aux niveaux en mètres de 20 m à 1500 m en 18 niveaux.

La résolution horizontale pour le monde est de 0,5° (36 km) et 0,1° (7,6 km) pour l'Europe.

Une fois le ou les fichiers de données récupérés, on peut traiter ces données à sa guise. En l'occurrence, je réalise un calcul de N et de  $\Delta N/\Delta h$  pour obtenir le gradient entre chaque niveau. On peut alors obtenir une carte telle que celle de la figure 3.

Au lieu d'afficher N, affichons maintenant sur la *figure 4* la moyenne des gradients (normale -40/km)

Enfin, personnalisons l'échelle des couleurs et ajoutons quelques fioritures pour obtenir la carte finale de la figure 5.

Une possibilité intéressante est de pouvoir visualiser l'évolution de N pour un point géographique donné comme on le voit sur les sondages verticaux des sondes météo.

La courbe de la figure 6 a été réalisée pour le 7 août à 06 UTC à Paris.

En noir l'indice de réfraction N en fonction de la hauteur.

En vert, la droite de l'évolution standard théorique de N à -40N/km

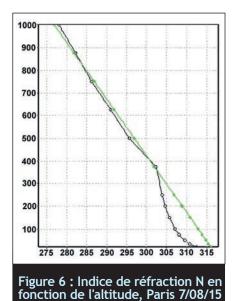
L'évolution de N est très proche de la normale, donc pas de propagation particulière à attendre.

Prenons maintenant un point se situant sur la côte méditerranéenne proche de Montpellier (figure 7). Ici le gradient N est éloigné de la droite standard dans les premiers 400 m puis retrouve la normale vers 700 m. C'est une situation propice.

On parle souvent « d'inversion de températures » comme cause de la propagation troposphérique.

On trouve en effet une corrélation, comme le montre la courbe de la *figure 8* pour la même région de Montpellier.

TECHNIQUE n° 896 • Mars 2016



La température au lieu de diminuer avec l'altitude (-6,5°/km) croît jusqu'à 400 m. Cependant, l'inversion n'est qu'un aspect du phénomène.

à 06UTC

Enfin, il est possible d'obtenir une « coupe » verticale sur un trajet donné entre deux stations.

Voir sur la *figure* 9 un exemple entre EI3KD et la balise du Cap Vert reçue en Irlande entre le 20 et le 21 mai 2015.

Cette coupe utilise le modèle GFS moins détaillé en niveaux.

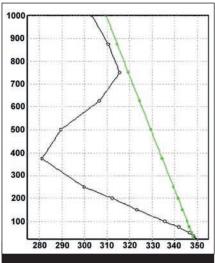


Figure 7 : Gradient d'indice élevé = situation propice à la propagation tropo

L'axe des X est la longitude, l'axe des Y représente les niveaux de pressions décroissant avec l'altitude. D4 (Cap Vert) se situe à gauche du graphique et El (Irlande) à droite. Les courbes vertes donnent l'altitude réelle.

On visualise parfaitement un trajet continu entre les deux stations avec des gradients très forts sur toute la longueur du circuit.

De plus, les extrémités de ce « tube » rejoignent idéalement la surface.

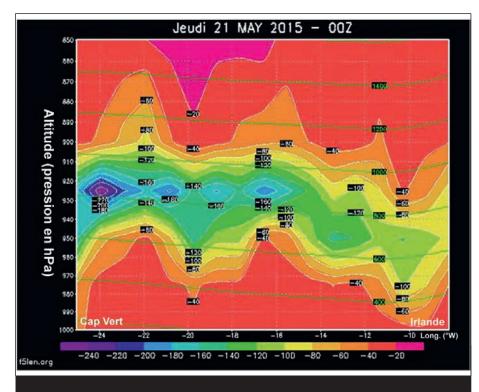


Figure 9 : Gradients d'indices N sur un trajet donné

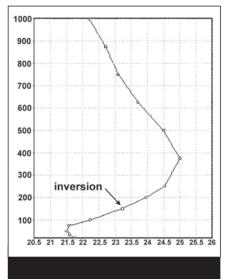


Figure 8 : Inversion de température

#### LIMITES DES PRÉVISIONS

Les données exploitées souffrent des mêmes problèmes de fiabilité que les prévisions météo courantes... Évidemment, plus on s'éloignera de la situation initiale, plus les modèles pourront diverger.

J'ai éludé les propriétés des ducts que l'on peut comparer dans une certaine mesure à des guides d'ondes. Je dois quand même préciser deux choses :

- D'abord le couplage avec le guide. Il est nécessaire de pouvoir « entrer » dans ce tube.
- Soit parce que l'antenne se trouve à la bonne altitude, soit parce que la distance et l'angle d'incidence du faisceau permettent ce couplage.
- D'autre part il peut exister une fréquence de coupure qui dépend de l'épaisseur d'un duct. Il est très probable que des conditions propices se produisent plus fréquemment qu'on ne le pense sur les fréquences les plus hautes. C'est l'une des raisons pour lesquelles, au même moment et sur un même trajet, l'intensité des signaux reçus sera peut-être plus forte en 23 cm qu'en 2 m par exemple. De nombreux rapports font état de ce genre de situation.

#### EN GUISE DE CONCLUSION

Au-delà du domaine amateur, des études très sérieuses continuent à être menées de par le monde afin de modéliser ces phénomènes de réfraction dans l'atmosphère qui peuvent impacter des applications aussi diverses que les signaux radar, les signaux GPS ou encore les observations astronomiques dans le visible comme dans le domaine radio.

N'hésitez pas à me relater sur « http://tropo.f5len.org » vos expériences divergentes des situations publiées sur les cartes. Cela me permettra d'améliorer les calculs effectués et d'affiner le modèle ou la présentation.

Enfin, il n'est surtout pas conseillé d'attendre qu'une carte vire au rouge pour allumer son taxi!

### **QUELQUES RÉFÉRENCES:**

- Radio meteorology by Bean, B.
  R. (Bradford R.), 1927; Dutton,
  E. J; Central Radio Propagation Laboratory (U.S.) Published 1966
- Propagation troposphérique et météorologie/ (A. Bertemes F3NB
   Radio REF février 1969)
- The role of elevated ducting for radio service and interference fields./ (H.T. Dougherty and E.J. Dutton 1981 - 61 pages)
- Geophysical Aspects of Atmospheric Refraction./ (CHARLES G. PURVES Aerospace Systems Branch Space Systems Division 1974 45 pages)

- Tropospheric Radio Wave Propagation. Part I/ (AGARD conference proceedings n°70 Advisory group for Aerospace research & development 1970)
- PARABOLIC EQUATION SOLUTION OF TROPOSPHERIC WAVE PRO-PAGATION USING FEM/ (Progress In Electromagnetics Research, PIER 49, 257-271, 2004)
- Transhorizon Radiowave Propagation due to Evaporation Ducting/ (S D Gunashekar, D R Siddle and E M Warrington 2006)
- P.453-11 (07/2015) Indice de réfraction radioélectrique : formules et données de réfractivité.

#### NOTE:

(1) N.D.L.R.: Il s'agit du site Internet « Worldwide Tropospheric Ducting Forecast » de William Hepburn (http://www.dxinfocentre.com/tropo\_eur.html). Il serait intéressant pour tout expérimentateur de comparer les prévisions offertes par les deux sites avec les conditions réelles de propagation constatées.