

# **Analyse des conditions troposphériques lors d'une ouverture sur 47GHz : exemple du DX entre F6BVA/P et F6ETU/P du 11 Novembre 2006**

**Par Matthieu F4BUC**

Les DX sont toujours de bonnes occasions pour étudier les phénomènes de propagation, surtout quand ils sont rares. En l'occurrence le QSO réalisé le 11 Novembre sur 47GHz entre F6BVA et F6ETU sur plus de 300km va nous permettre de réaliser quelques analyses sur le mode de propagation troposphérique. La distance remarquable de la liaison réalisée renforce d'autant l'intérêt de réaliser cette analyse afin de mieux comprendre comment de tels QSO sont réalisables, et peut être permettre de mieux prédire les ouvertures sur cette bande dans l'avenir.

Cependant la prédition est un art difficile et représente un travail conséquent nécessitant de se baser sur un nombre important d'observations et d'analyses.

La méthode ici consiste à partir d'observations pour réaliser une analyse détaillée et aboutir à quelques conclusions.

## ***Les faits***

Le QSO réalisé a eu lieu en milieu de matinée et il représente un trajet d'un peu plus de 300 km, distance tout à fait remarquable sur cette bande.

F6BVA se trouvait au sommet du mont Ventoux en JN24PE à 1890m d'altitude et F6ETU au col de Paillère en JN02XR à 2300m d'altitude.

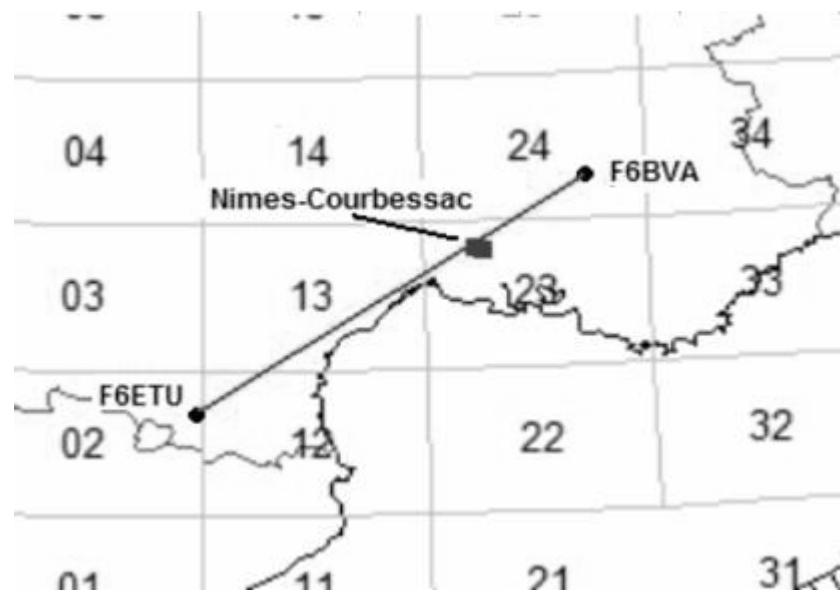
## ***Les observations***

Un certain nombre de stations météorologiques réalisent des sondages troposphériques journaliers. De tels sondages consistent à lancer des ballons équipés de capteurs météos. Les mesures sont retransmises par liaison radio au sol. Deux sondages sont réalisés par jour, un à 00H00 TU et un autre à 12H00 TU.

Les archives des relevés de mesure sont disponibles dans le domaine public et peuvent être récupérés facilement sur Internet. Un bon site pour récupérer ces données est celui de l'Université du Wyoming à l'adresse : <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>  
Sur l'hexagone on compte 6 stations de radiosondage et une en Corse. Il est possible de les visualiser sur le site d'Infoclimat à l'adresse : <http://www.infoclimat.fr/radiosondages/>

Par chance, une station de sondage se situe juste sur la trajectoire du QSO ! C'est la station de Nîmes-Courbessac.

La carte suivante montre son emplacement. Ses données de sondage vont donc nous être très précieuses pour notre analyse.



Le tableau suivant montre le type de mesures accessibles sur la masse d'air: Pression (« PRES »), Température (« TEMP »), Température du point de rosée (« DWPT »), Humidité relative (« RELH »), Rapport de masse vapeur d'eau/air sec (« MIXR »), Directions et vitesses du vent (de « DRCT » à « THTV »). L'altitude (« HGHT ») est exprimée par rapport au niveau de la mer.

07645 LFME Nimes-Courbessac Observations at 12Z 11 Nov 2006

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1021.0	62	16.2	10.2	68	7.70	110	2	287.6	309.5	289.0
1000.0	238	13.4	8.9	74	7.20	140	4	286.6	306.9	287.8
996.0	272	13.0	8.7	75	7.13	146	4	286.5	306.6	287.7
981.0	399	12.4	8.7	78	7.24	168	6	287.1	307.6	288.4
952.0	650	11.0	2.0	54	4.67	213	8	288.2	301.7	289.0
925.0	890	9.8	2.8	62	5.09	255	11	289.3	304.1	290.2
914.0	989	9.3	2.9	64	5.20	270	12	289.8	304.9	290.7
885.0	1256	8.0	3.3	72	5.51	279	15	291.1	307.2	292.1
872.0	1378	8.0	-14.0	19	1.49	283	16	292.4	297.1	292.6
850.0	1589	8.0	-24.0	8	0.65	290	18	294.5	296.7	294.6
846.0	1628	8.0	-27.0	6	0.50	291	18	294.9	296.6	295.0
827.0	1815	8.0	-11.0	25	2.01	297	20	296.8	303.2	297.2
789.0	2201	5.4	-0.6	65	4.66	310	23	298.1	312.2	298.9
773.0	2368	4.2	-1.8	65	4.37	315	25	298.6	311.9	299.4
748.0	2635	2.4	-3.6	65	3.94	313	26	299.4	311.5	300.1
700.0	3169	-0.5	-6.5	64	3.37	310	28	301.9	312.4	302.5
648.0	3781	-4.1	-10.1	63	2.75	307	31	304.6	313.4	305.1

Les données qui nous intéressent particulièrement pour une analyse de propagation troposphérique sont les mesures relatives à la température, la pression et à l'humidité en fonction de l'altitude.

Les phénomènes de propagation troposphériques sont liés à une courbure anormalement élevée du trajet de l'onde causée par un gradient de l'indice de réfraction plus important que la normale.

Le principe de l'analyse consiste donc à calculer et étudier la variation de cet indice de réfraction de l'air.

Sur 47GHz l'absorption de l'air joue un rôle déterminant. C'est pourquoi dans notre analyse nous allons également calculer et observer la variation de cette absorption.

En ce qui concerne l'indice de réfraction, par raison de commodité, nous utilisons l'indice de réfraction relatif ou "co-indice" N défini par  $N = (n-1).10^6$ , n étant l'indice de réfraction. La loi empirique permettant de calculer N est la suivante:

$$N = 77,6 \cdot \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \cdot \frac{e \cdot f}{T^2} = N_s + N_h$$

avec:

T : Température en Kelvin

P : Pression en hPa

f : l'humidité relative entre 0 et 1

e : la pression de vapeur d'eau saturante (c'est à dire la quantité d'eau exprimée en pression que l'air peut contenir avant qu'elle ne condense en eau ou en glace)

e est empiriquement calculée par la formule de MAGNUS:

$$e = 6,10 \cdot 10^{(7,448 \cdot t / (234,7 + t))}$$

avec t : température de l'air en °C.

Le co-indice N se divise en deux termes Ns et Nh où Ns est la contribution "sèche" liée seulement à la température et à la pression et où Nh est la contribution "humide" liée principalement à l'humidité de l'air.

Contrairement à la température et à la pression, l'humidité de l'air est un paramètre extrêmement variable selon les conditions météorologiques. C'est en fait cette variabilité qui est principalement la cause de l'apparition de gradients d'indice importants responsables des phénomènes de propagation troposphérique.

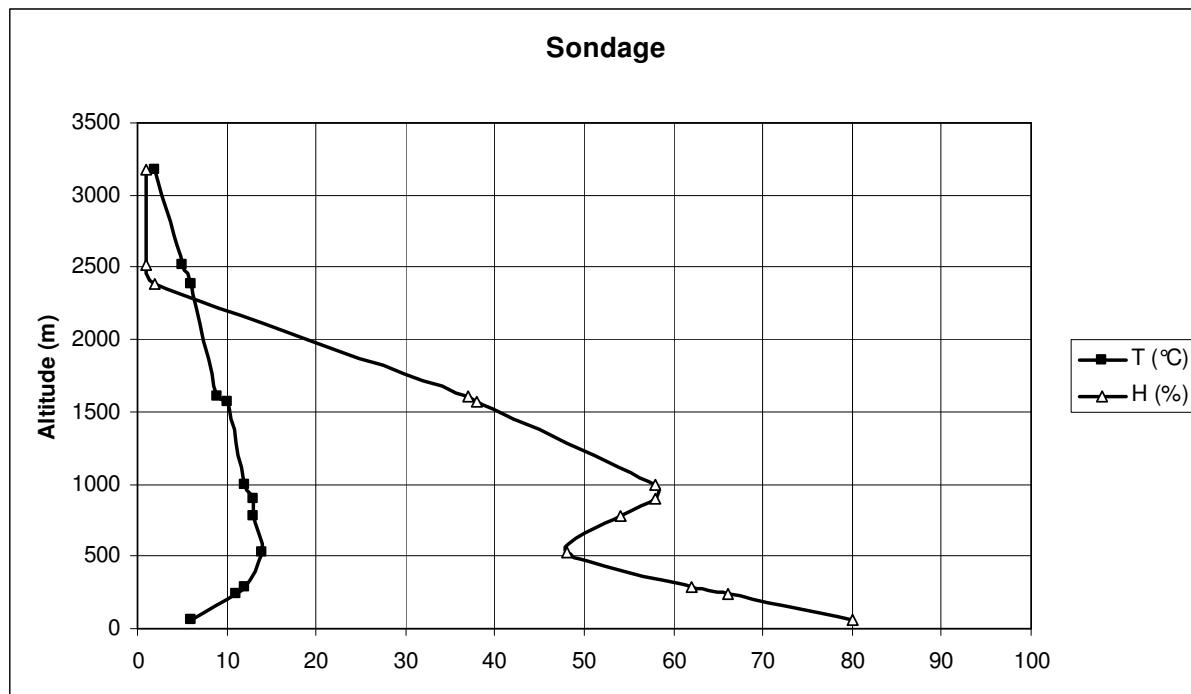
Pour que le rayon de courbure de la trajectoire de l'onde soit plus petit que le rayon de la Terre, c'est-à-dire pour que l'onde redescende vers le sol, il faut que le gradient d'indice soit inférieur à -157 unités/km.

## Le sondage de 00H00 TU

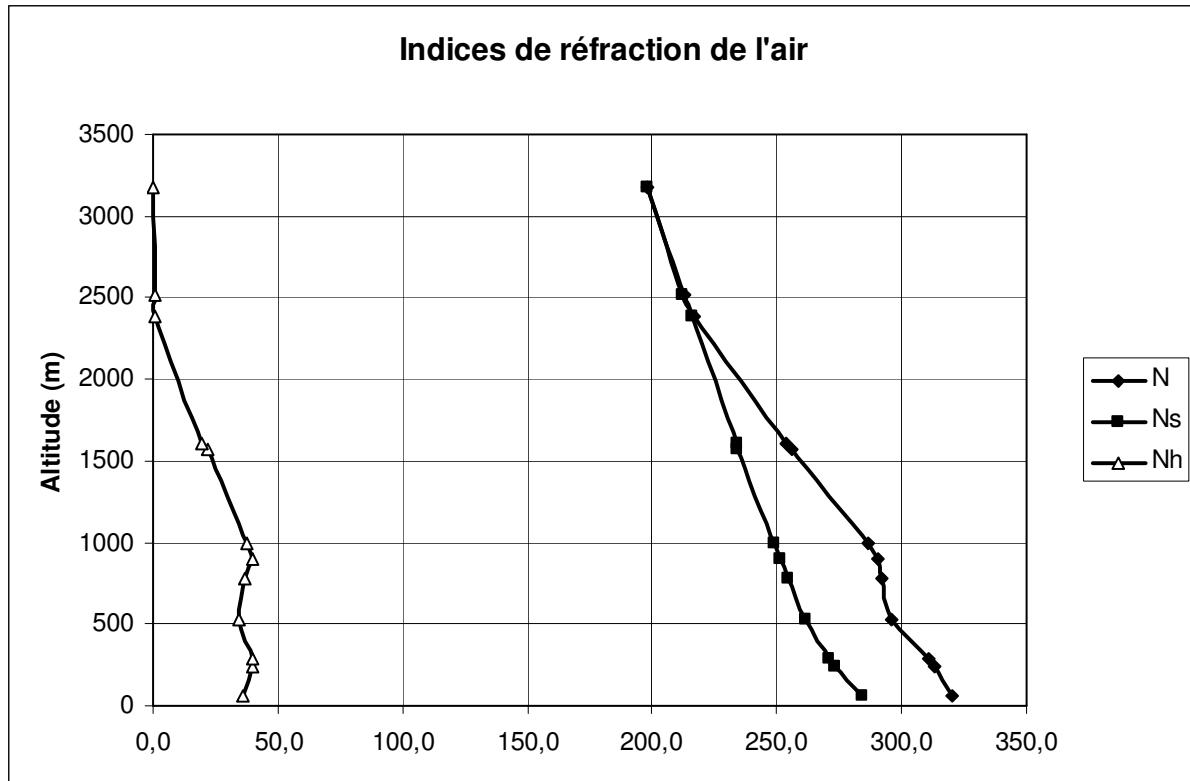
Le tableau suivant reprend les mesures du sondage et pour chaque altitude calcule N et ses deux composantes Ns et Nh, le gradient d'indice, et enfin l'absorption de l'air. L'absorption de l'air est décomposée selon l'absorption de l'oxygène, et celle de la vapeur d'eau. Enfin l'atténuation totale du trajet (toujours pour une même altitude) est calculée en prenant pour

hypothèse que l'absorption kilométrique reste constante tout le long du trajet (à cette même altitude). Le calcul de ces absorptions a été réalisé par des formules approchées et seraient trop longues à écrire ici. Elles sont extraites de la recommandation ITU-R référence P.676-6 « Affaiblissement du aux gaz de l'atmosphère ».

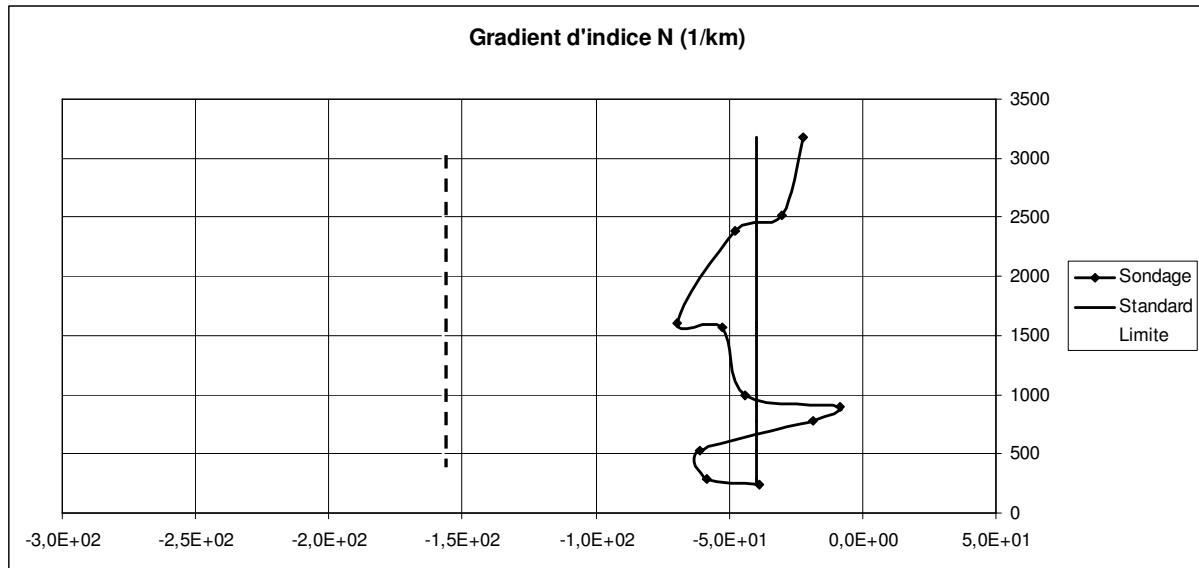
Alt (m)	H (%)	T (°C)	P (hPa)	Vap. Eau (g/m3)	N	Ns	Nh	Gradient (1/km)	Absorption			
									vapeur d'eau	Absorption oxygène	Absorption totale	Absorption liaison
									dB/km	dB/km	dB/km	dB
62	80	6	1023	5,9	320,4	284,5	35,9		0,090	0,153	0,242	75
244	66	11	1000	6,7	313,4	273,2	40,1	-3,9E+01	0,105	0,140	0,245	76
286	62	12	995	6,7	310,9	270,9	40,0	-5,8E+01	0,105	0,138	0,242	75
526	48	14	967	5,9	296,3	261,5	34,8	-6,1E+01	0,090	0,128	0,218	67
774	54	13	939	6,2	291,7	254,8	36,9	-1,8E+01	0,096	0,122	0,217	67
900	58	13	925	6,7	290,7	251,0	39,7	-8,4E+00	0,104	0,118	0,222	69
1000	58	12	914	6,3	286,3	248,9	37,4	-4,4E+01	0,097	0,116	0,213	66
1576	38	10	854	3,6	255,9	234,2	21,8	-5,3E+01	0,051	0,103	0,155	48
1606	37	9	850	3,3	253,8	233,9	19,9	-6,9E+01	0,046	0,103	0,150	46
2386	2	6	776	0,1	216,7	215,8	0,9	-4,8E+01	0,002	0,088	0,090	28
2514	1	5	761	0,1	212,8	212,4	0,4	-3,0E+01	0,001	0,086	0,087	27
3179	1	2	701	0,1	198,2	197,8	0,3	-2,2E+01	0,001	0,075	0,075	23



Les variations de la température et de l'humidité n'ont rien d'anormal à 00H00 TU.

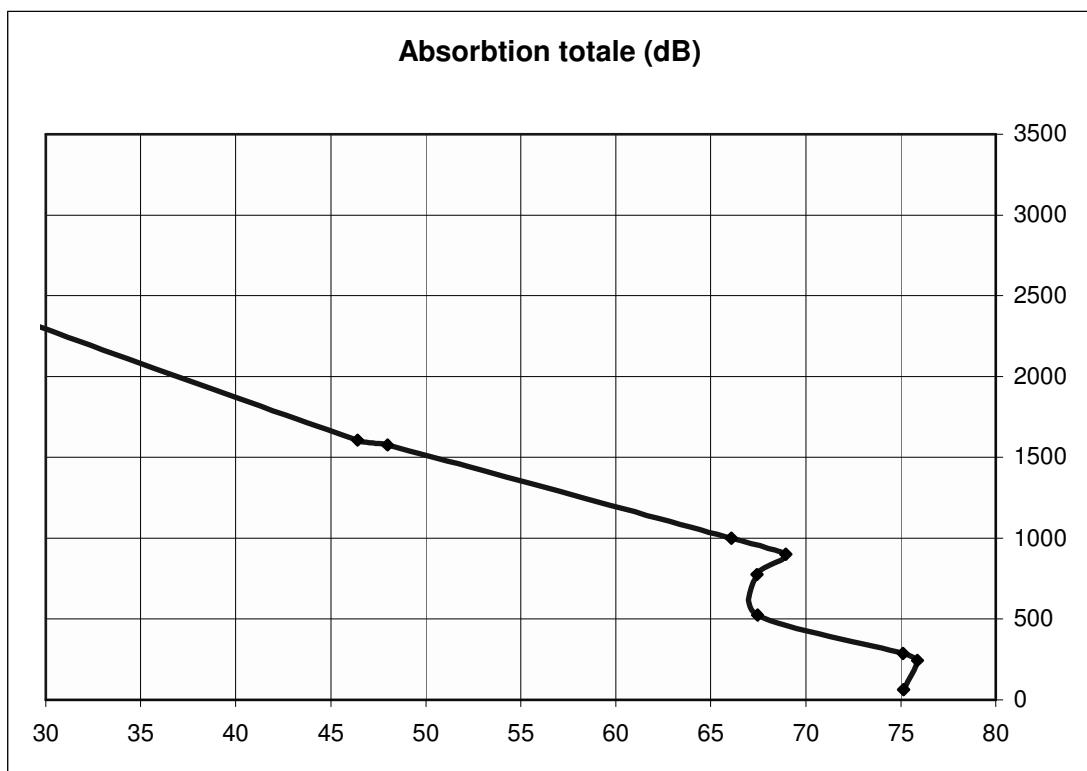


Les courbes de variation du co-indice N suivent une loi de décroissance normale de l'ordre de -50 à -40 unités/km.



Le gradient d'indice oscille autour de la valeur moyenne d'une atmosphère standard soit -40 unités/km représenté par un trait vertical.

Nous voyons bien qu'il n'y a pas ici de phénomène de propagation particulier.



Quand à l'absorption, elle est de l'ordre de 50 dB à 1500m et 70dB environ à 250m. Ces valeurs représentant l'absorption à altitude constante tout le long du trajet il faut en fait tenir compte de la variation d'altitude de la trajectoire de l'onde par rapport au sol. En effet comme nous avons vu que le gradient d'indice ne produisait pas de courbure significative de l'onde, cette dernière se propage donc quasiment de façon droite et traverse alors les couches basses de l'atmosphère plus absorbantes.

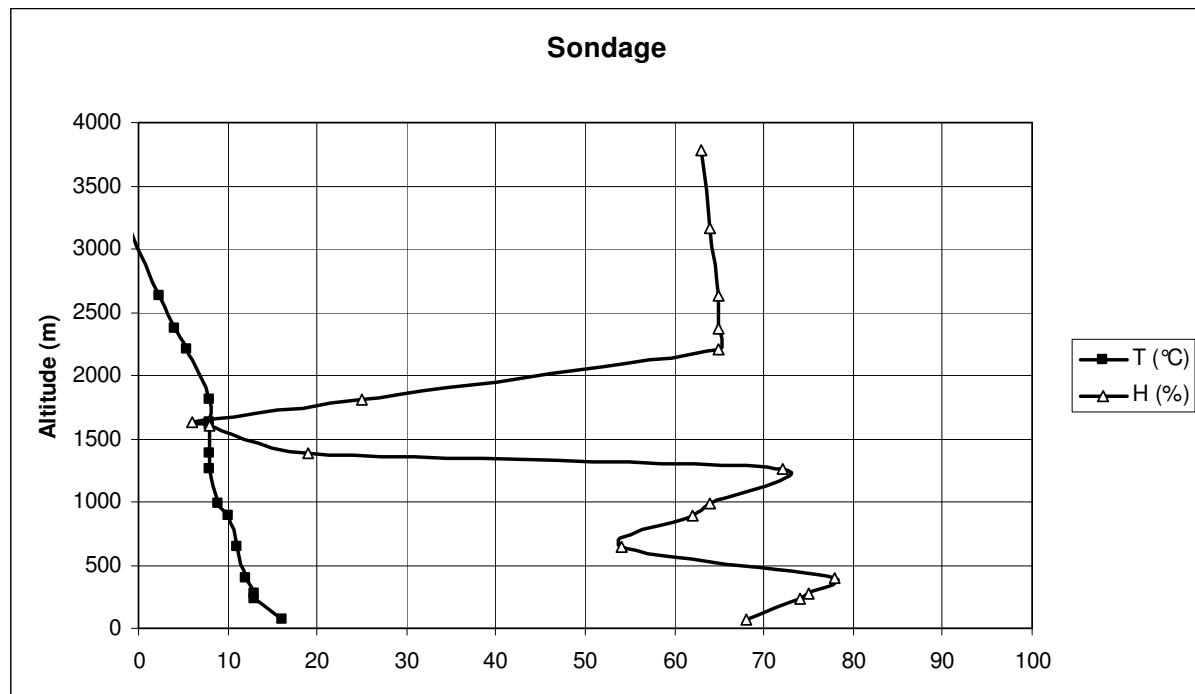
On peut donc estimer l'atténuation totale en prenant la moyenne soit  $50*0.5 + 70*0.5 = 60$  dB.

## Sondage de 12H00 TU

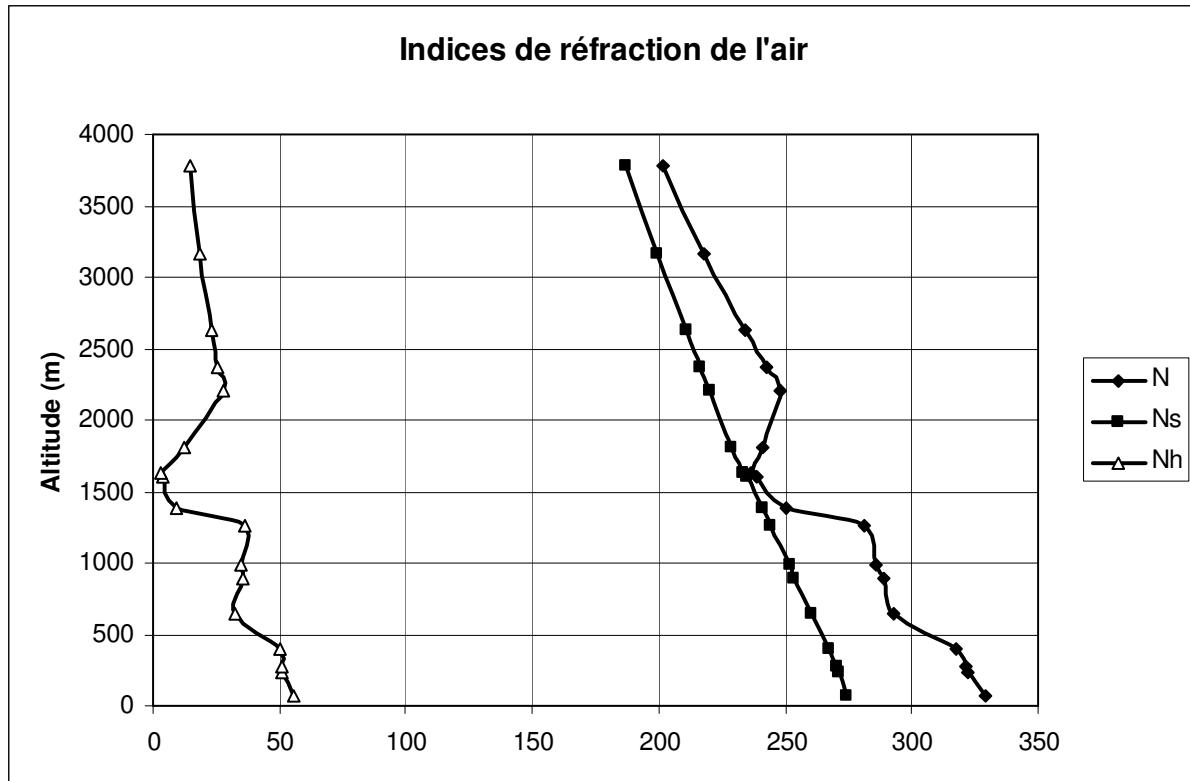
Cette fois-ci nous voyons apparaître clairement une ouverture troposphérique.

Alt (m)	H (%)	T (°C)	P (hPa)	Vap. Eau (g/m³)	N	Ns	Nh	Gradient (1/km)	Absorption			
									vapeur d'eau	oxygène	totale	liaison
62	68	16	1021	9,4	329,5	274,2	55,3		dB/km	dB/km	dB/km	dB
238	74	13	1000	8,5	322,0	271,3	50,6	-4,3E+01	0,140	0,138	0,278	86
272	75	13	996	8,7	321,6	270,2	51,3	-1,2E+01	0,143	0,137	0,279	87
399	78	12	981	8,5	317,4	267,1	50,3	-3,3E+01	0,139	0,134	0,272	84
650	54	11	952	5,5	293,0	260,1	32,8	-9,8E+01	0,083	0,127	0,210	65
890	62	10	925	5,9	289,1	253,6	35,5	-1,6E+01	0,090	0,121	0,211	66
989	64	9	914	5,7	286,0	251,5	34,5	-3,2E+01	0,087	0,119	0,206	64
1256	72	8	885	6,1	280,9	244,4	36,5	-1,9E+01	0,092	0,113	0,205	64

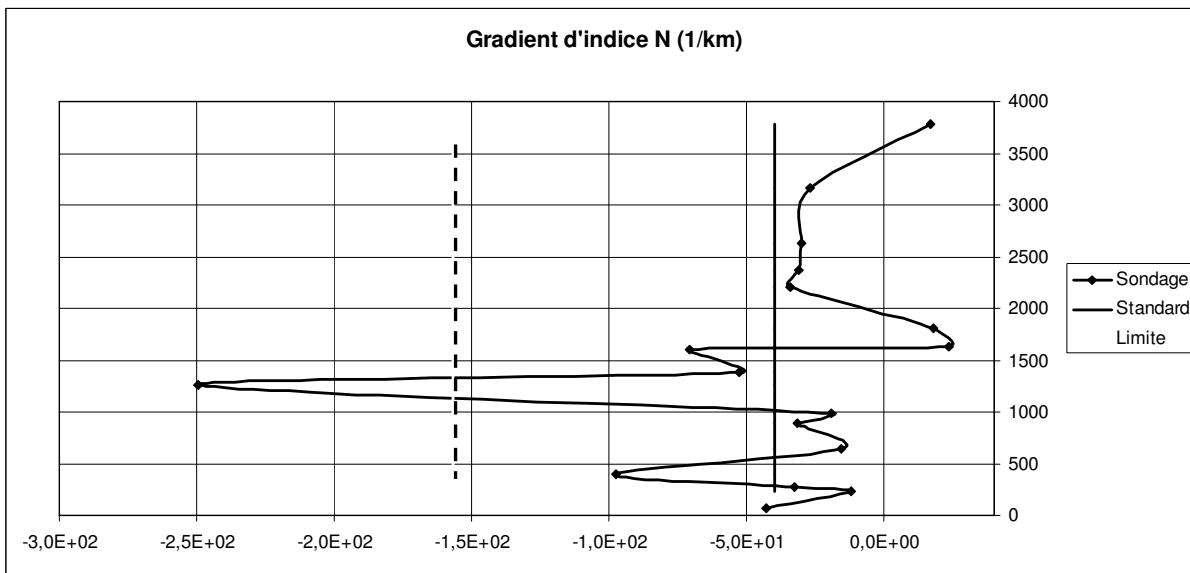
<u>1378</u>	<u>19</u>	<u>8</u>	<u>872</u>	<u>1,6</u>	<u>250,4</u>	<u>240,8</u>	<u>9,6</u>	<u>-2,5E+02</u>	<u>0,021</u>	<u>0,110</u>	<u>0,131</u>	<u>41</u>
1598	8	8	850	0,7	238,8	234,7	4,1	-5,3E+01	0,009	0,104	0,113	<u>35</u>
1628	6	8	846	0,5	236,7	233,6	3,0	-7,1E+01	0,006	0,103	0,110	<u>34</u>
1815	25	8	827	2,1	241,1	228,4	12,7	2,3E+01	0,028	0,099	0,127	39
2201	65	5,4	789	4,6	248,0	219,9	28,1	1,8E+01	0,067	0,092	0,159	49
2368	65	4	773	4,2	242,2	216,6	25,7	-3,4E+01	0,061	0,089	0,150	46
2635	65	2,4	748	3,8	234,0	210,8	23,2	-3,1E+01	0,054	0,085	0,138	43
3169	64	-1	700	2,9	218,0	199,7	18,3	-3,0E+01	0,041	0,076	0,117	36
3781	63	-4	648	2,3	201,6	186,9	14,7	-2,7E+01	0,032	0,067	0,099	31



Le profil de sondage fait apparaître une variation significative de l'humidité relative de l'air autour de 1500m d'altitude.

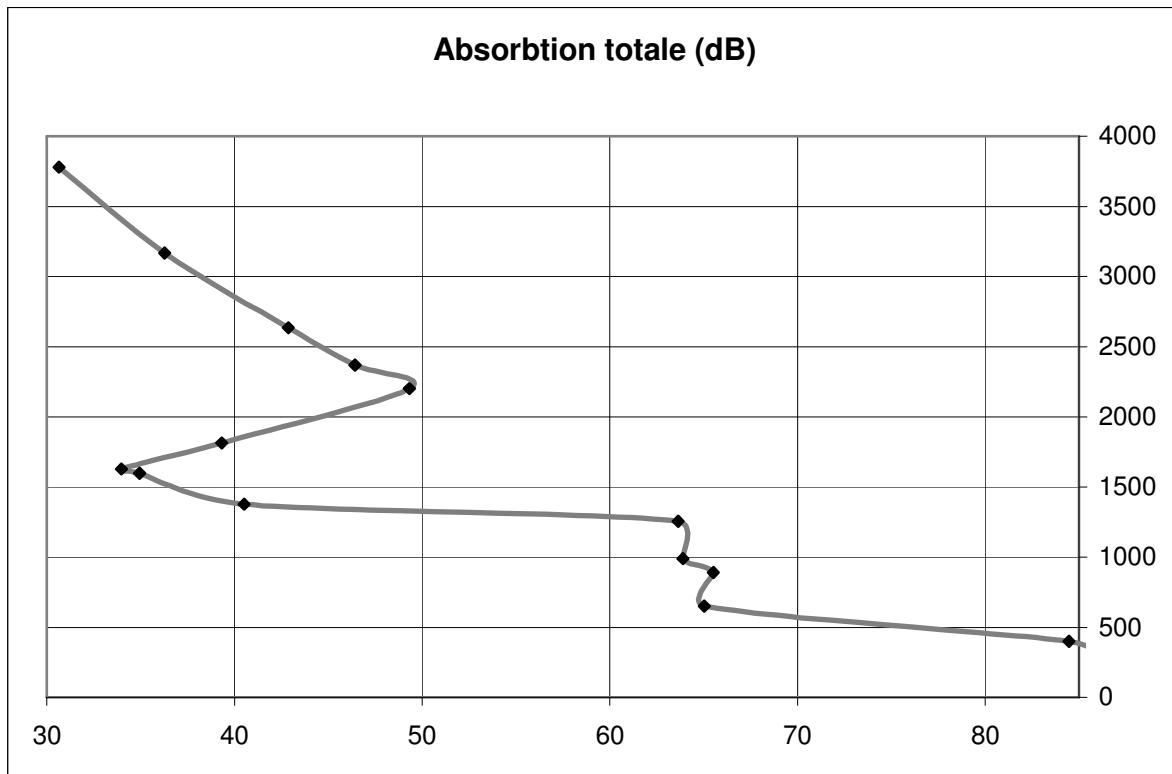


Les profils du co-indice montrent clairement une perturbation liée à la composante Nh, composante liée à l'humidité, vers 1500m. Remarquez bien que la composante Ns, la contribution sèche, n'est pas du tout perturbée.



Le gradient d'indice, quand à lui, fait un « bond » très prononcé à 1300m, de -250unités/km, dépassant la valeur limite de -157unités/km (trait vertical pointillé), provoquant donc les conditions d'une ouverture troposphérique intense.

Il s'agit véritablement d'une couche d'inversion ne dépassant pas en étendue 250 mètres de hauteur.



Cette fois-ci pour le calcul de l'absorption nous pouvons considérer que la trajectoire de l'onde reste à altitude constante tout le long du trajet entre les deux stations.  
Nous voyons sur le graphe que l'atténuation totale n'est alors plus que de 35 dB à 1500m. C'est un véritable conduit sec peu absorbant qui s'est créé autour de 1500m d'altitude et étalé sur une hauteur de presque 500 mètres.

Par rapport aux conditions de 00H00 TU, cela représente une amélioration de  $60 - 35 = 25$  dB sur le bilan de liaison !

## ***Les conclusions***

Les analyses précédentes mettent clairement en évidence l'apparition dans la matinée d'une inversion due à une couche d'air très sèche au dessus d'une couche d'air plus humide, la frontière se situant vers 1500m et provoquant :

- une forte courbure de la trajectoire de l'onde
- une diminution significative de l'atténuation de l'air juste au dessus de l'inversion

Bien entendu il est impossible d'affirmer avec certitude que cette configuration ait été rigoureusement identique tout le long du trajet. Néanmoins l'observation des données du sondage de Nîmes-Courbessac met en évidence clairement un « cas d'école » de configuration provoquant une forte ouverture troposphérique.

En conclusion, une forte inversion a créé un effet de canalisation permettant aux ondes d'emprunter une couche d'air sèche et peu absorbante à 47 GHz.  
L'altitude élevée des deux stations a sans aucun doute favorisé la pénétration de l'onde dans cette canalisation.

Voici pour l'observation et l'analyse du profil troposphérique. L'étape d'analyse suivante consisterait à analyser les conditions météorologiques le long du trajet afin de comprendre quels sont les phénomènes qui ont été à l'origine de cette inversion.  
Amis météorologistes, à vos plumes !

Bon DX

Matthieu F4BUC  
f4buc@aliceadsl.fr