

Rapport ANFR sur les phénomènes de propagation anormale :
propagation par conduit et réflexion/réfraction sur les couches
élevées de l'atmosphère

Référence ANFR(15)01

Table des matières

I - Introduction & Généralités sur la propagation des ondes dans le domaine VHF-EHF	3
II - Les conduits de propagation.....	5
2.1 Caractéristiques des conduits de propagation.....	5
2.2 Les différents types de conduits de propagation	7
2.3 Les données radio climatiques nécessaires à la modélisation des conduits de propagation..	11
2.4 La propagation dans les conduits	12
2.4.1 Couplage d'une onde dans un conduit.....	12
2.4.2 Les pertes dans les conduits	13
2.4.3 Exemple de propagation et de trajectoire dans les conduits	13
2.5 L'apparition des phénomènes de propagation anormale	17
III - Modélisation du « ducting ».....	20
3.1 Modélisation par la théorie des modes ou « full wave »	20
3.2 Modélisation par l'équation des ondes	21
3.3 Modélisation semi-déterministe et/ou empirique	22
3.3.1 Modélisation semi-déterministe et empirique	23
3.3.2 Modèle empirique : la Recommandation UIT-R P.1546.....	38
IV - Conclusion	39
4.1 Conclusion sur les phénomènes de propagation anormale.....	39
4.2 Conclusion sur les modèles de propagation anormale.....	39
V - Bibliographie.....	41
VI - Annexes	43
6.1 Les données du gradient d'indice de réfraction en France	43
6.2 Les données des conduits de propagation en France	44
6.3 Etude des éléments A(p) en fonction de $\beta(\%)$ et $p(\%)$	46
6.4 Dépouillement & Analyse des mesures du COST210.....	46

I - Introduction & Généralités sur la propagation des ondes dans le domaine VHF-EHF

Les phénomènes associés à la propagation d'une onde EM (Electromagnétique) sont tout d'abord étroitement liés à la longueur du chemin de propagation et plus particulièrement à la distance relative du trajet des ondes par rapport à l'horizon radioélectrique:

1. Lorsque la distance est plus courte que l'horizon radioélectrique, le trajet est dit en ligne de vue ou de mire (« line of sight »). Lorsqu'elle est plus grande, le trajet est dit transhorizon.

Indépendamment de ce qui a été énoncé ci-dessus, la propagation d'un signal est souvent un phénomène compliqué, influencé par une très large variété de facteurs. Ces derniers peuvent être regroupés en deux grands ensembles :

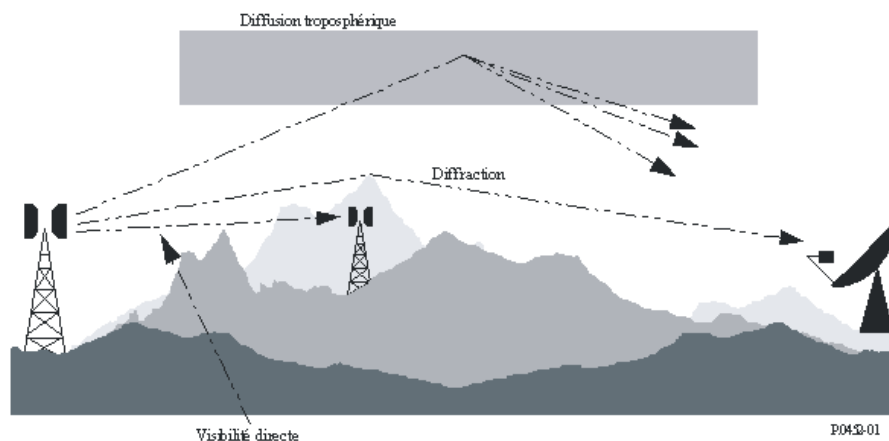
1. Topographique (naturel – terrain - ou artificiel – structure construite).
2. Climatique et/ou météorologique.

Si le premier type de facteurs est invariant temporellement et uniquement associé à un chemin de propagation (c'est-à-dire au chemin des ondes entre un émetteur et un récepteur), le second type, quant à lui, présente, par nature, une évolution aléatoire dans le temps (temps clair, pluie, brume, modification des couches de l'atmosphère, etc...). Les pertes de propagation associées à ces événements climatiques et/ou météorologiques sont donc variables temporellement et leurs valeurs fluctuent, pour un chemin de propagation donné, statistiquement.

En fonction des éléments avancés précédemment, les différents mécanismes de propagation mis en jeu sur un chemin particulier sont donc répertoriés suivant leur probabilité d'apparition, on retrouve :

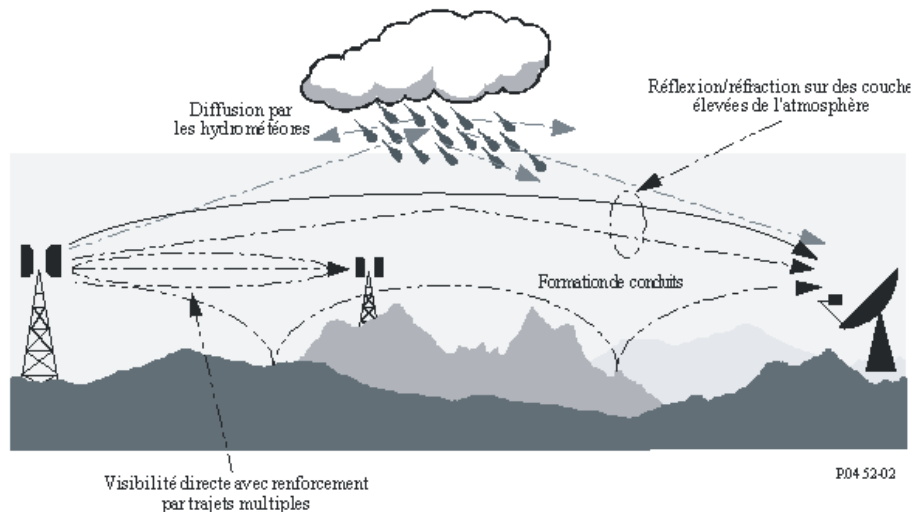
1. Les mécanismes avec une probabilité importante, c'est-à-dire associée à des conditions de propagation normale (« long terms ») :
 - a. *La visibilité directe* : Le cas le plus simple de propagation qui correspond à un trajet en visibilité directe dans des conditions atmosphériques normales (c'est-à-dire une atmosphère bien mélangée). Sur les trajets les plus courts (c'est-à-dire pour les trajets de longueur inférieure à 5 km environ), les niveaux des signaux peuvent fréquemment subir des renforcements importants pendant de courtes périodes, en raison d'effets de propagation par trajets multiples et de focalisation dus à la stratification de l'atmosphère (voir la Fig. 2). A cette visibilité directe est toujours associé le calcul des pertes en espace libre.
 - b. *Diffraction* (Fig. 1 et Fig.3): Ce phénomène est le principal acteur des pertes associées à la topographie du terrain. Au-delà de la visibilité directe (LoS, *line-of-sight*) et dans les conditions normales, il y a généralement prédominance des effets de diffraction chaque fois qu'on a affaire à des niveaux de signal élevés.
 - c. *Diffusion troposphérique* (Fig. 1 et Fig.3): Ce mécanisme définit le niveau de pertes ambiant pour de longs trajets (par exemple, plus de 100-150 km), sur lesquels le champ de diffraction devient très faible. Dans ce mécanisme, la troposphère se comporte comme un écran plus ou moins réfléchissant pour les ondes EM.
 - d. *Absorption par les gaz de l'atmosphère* : Ce mécanisme est présent tout le temps et sa force sur les valeurs de pertes de propagation est totalement dépendante de la fréquence.

Figure 1 : Propagation Normale (Extrait de l'UIT-R P.452)



2. Les mécanismes avec une probabilité faible, c'est-à-dire associée à des conditions de propagation anormale (nommés « short terms ») :
 - a. *Formation de conduits au sol* (Fig. 2): C'est le phénomène de propagation à court terme le plus important observé au-dessus d'étendues d'eau ou dans des zones côtières à relief peu marqué. Ce phénomène peut donner des niveaux de signal élevés sur de grandes distances (plus de 500 km au-dessus de la mer). Dans certaines conditions, ces niveaux peuvent dépasser le niveau de ceux obtenus en « espace libre ».
 - b. *Réfraction et réflexion sur les couches hautes de l'atmosphère* (Fig. 2): la réfraction dans et/ou la réflexion sur des couches hautes (quelques centaines de mètres ou plus) permet aux signaux de surmonter efficacement l'affaiblissement par diffraction sur le terrain. Le phénomène peut avoir des incidences importantes sur les distances moyennes à grandes et reste la source principale de propagation transhorizon (propagation au-delà de l'horizon radioélectrique)
 - c. *Diffusion par les hydrométéores* (Fig. 2): La diffusion par les hydrométéores est clairement liée à l'action de la pluie sur la propagation. Celle-ci reste particulièrement faible à fréquence basse ou moyenne, mais peut être très importante dans le haut de la SHF et dans l'ensemble de l'EHF. En règle générale dans les études de compatibilité, l'action de la pluie (pertes supplémentaires) n'est pas prise en compte du fait d'études menées dans des conditions « pire cas » de brouillage (donc toujours considérées par temps clair).
 - d. *Réflexion sur les couches ionosphériques sporadiques E* : La couche E de l'ionosphère se situe entre 90 et 120 km au-dessus du sol, bien au-delà des couches dont il est question ci-dessus (cf. b)). Ce type de propagation a plutôt une incidence aux fréquences basses, voire très basses (à partir du bas de la VHF ou du haut de la HF). Dans les bandes au-dessus, ce phénomène est inexistant.

Figure 2 : Propagation Anormale (Extrait de l'UIT-R P.452)

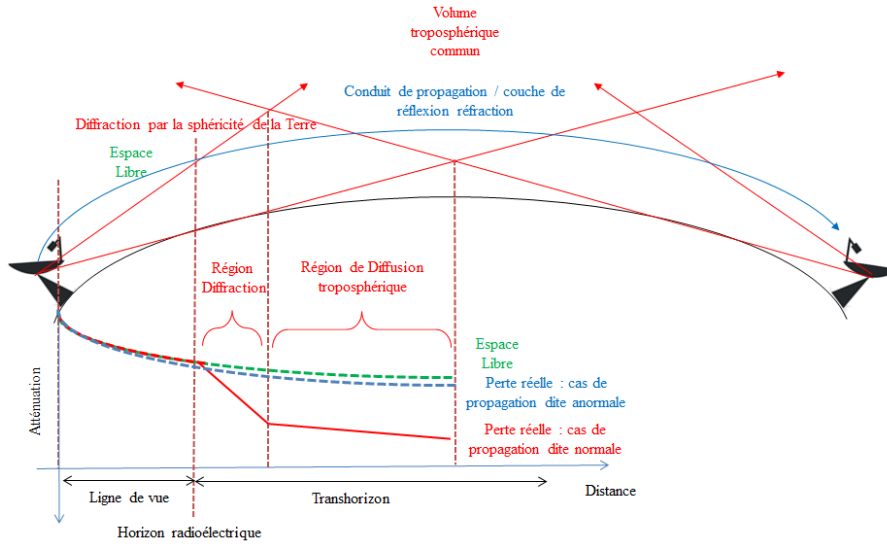


En règle générale, l'association d'un pourcentage de temps avec un type de trajet n'a de sens que pour les chemins transhorizon. En effet pour des trajets d'onde EM en ligne de vue, seules les pertes en espace libre et la diffraction ont des effets prédominants sur les pertes de la liaison (le pourcentage de temps dans ce type de trajet ne peut rendre compte que de l'amélioration du signal par multitrajets).

Pour les chemins transhorizon et comme présenté dans la Fig.3, le pourcentage de temps (associé bien entendu à des événements météorologiques), va modifier considérablement les pertes associées au trajet. Globalement, il peut être considéré que le pourcentage de temps et les pertes associées suivent une évolution identique (augmentation du pourcentage de temps associé à l'augmentation des pertes).

Ce rapport s'intéresse tout particulièrement aux phénomènes de propagation anormale et plus particulièrement à la formation de conduits de propagation et aux couches de réflexion/réfraction sur les couches hautes de l'atmosphère. Même s'il présente une probabilité de présence relativement faible, ils ont une incidence considérable sur les distances de propagation accessibles aux ondes électromagnétiques (EM) dans les bandes UHF et SHF. Sur des distances longues, à très longues (tenant donc compte de la sphéricité de la Terre), le comportement des pertes de ce type de propagation est plus proche de celui de l'espace libre que celui d'une configuration de propagation dite normale présentée Fig. 3.

Figure 3 : Répartition schématique des pertes dans les cas de propagation dite normale ou anormale sans profil de terrain



II - Les conduits de propagation

Dans les conditions dites d'espace libre, une onde électromagnétique traverse un milieu dont l'indice de réfraction est constant sur l'ensemble de son trajet et elle se propage donc en ligne droite. Cependant, si l'indice de réfraction du milieu change ou évolue, l'onde est dite réfractée, ou courbée, dans la direction où l'indice de réfraction augmente. Dans certains cas de composition de l'atmosphère, si l'indice de réfraction décroît rapidement avec l'altitude, l'onde électromagnétique se courbe si rapidement qu'elle vient frapper la surface terrestre. Cette condition est liée au phénomène de propagation guidée (ou « trapping »). Lorsque ces effets de rebonds se produisent dans des couches plus ou moins proches du sol, on parle alors de « ducting » (ou de conduit de propagation). Enfin lorsque les couches sont très élevées, les phénomènes de propagation sont dits de réflexion/réfraction (ou superréfraction). Dans le cas de chemin en visibilité, ces effets sont à l'origine des multi-trajets.

Lorsqu'un signal se propage au-dessus d'une large étendue d'eau, un phénomène appelé « conduit d'évaporation » peut apparaître. Ces canaux résultent de la décroissance rapide de l'humidité en fonction de l'altitude dans les quelques dizaines de mètres au-dessus de la surface de l'eau et sont très généralement assimilés aux phénomènes de « ducting ».

2.1 Caractéristiques des conduits de propagation

Typiquement, pour déterminer la propagation d'un signal électromagnétique au-dessus de la Terre, une atmosphère standard est considérée. Celle-ci est définie par un gradient d'indice de réfraction calculé sur la base d'une collection de conditions atmosphériques. L'un de ces facteurs prédominants est le gradient vertical de l'indice de réfraction ($dn/dz - n$ étant l'indice de réfraction et z la hauteur). L'évolution négative de ce facteur ($dn/dz < 0$) a pour incidence de courber les ondes vers la terre. La Fig.4 et le Tab.1 ci-dessous décrivent les différentes valeurs du gradient de l'indice de réfraction auxquelles les phénomènes de propagation sont apparentés.

Tableau 1: Condition de propagation associée à des gradients d'indice de réfraction réalistes

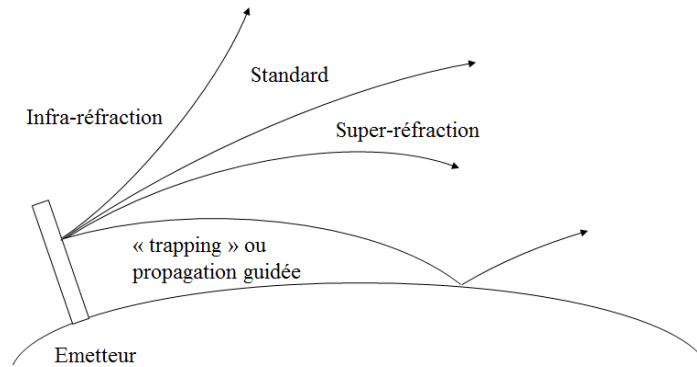
Condition	Gradient dN/dz (N/km) *	Gradient dM/dz (M/km)*
Propagation guidée	<-157	<0
Superréfraction	-157 à -79	0 à 79
Normal	-79 à 0	79 à 157
Standard	-39	118
Infraréfraction	>0	>157

*Les gradients N et M sont expliqués dans la suite de ce chapitre

Le Tab.1 donne deux types de valeurs de la réfractivité, le gradient de réfractivité radio (dN/dz) et le gradient de réfractivité modifié (dM/dz). L'indice de réfractivité radio peut être calculé à partir de l'indice de réfraction comme :

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

Figure 4 : Type de réfraction



Ce paramètre est défini comme tel, car le changement de l'indice de réfraction n aux altitudes basses est très faible et N permet donc de quantifier plus aisément les évolutions de l'indice. L'indice de réfraction modifié M , quant à lui est un terme qui permet de transposer le problème au-dessus d'une terre courbe en un problème sur une terre plate [1]. Il est défini comme :

$$M(z) = N(z) + \frac{z}{a} = N(z) + 0.157z = (n - 1) \times 10^6 + 0.157z$$

La quantité z correspond à l'altitude (en mètre équivalent à 157 si l'altitude est exprimée en km) au-dessus de la surface. La constante de multiplication 0.157 tient compte du rayon de la Terre ($a =$ approximativement 6369.43 km). Le terme M permet entre autre de mieux appréhender les conditions de propagation guidée (lorsque $dM/dz < 0$ M unité/km). Ce terme est thermiquement et barométriquement dépendant [2] [3] :

$$M(z) = \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4807e}{T} \right) + 0.157z$$

P et T désignant respectivement la pression (hPa) et la température (K). La pression de la vapeur e , fonction du point de rosée T_d est donnée par la relation :

$$e = 6.1078 \times 10^{\left\{ \frac{7.5 \times T_d}{2.73.3 + T_d} \right\}}$$

Il est possible de constater que l'indice de réfraction ou l'indice de réfraction modifié sont totalement indépendants de la fréquence. L'indice de réfraction de l'atmosphère est aussi à l'origine de l'inégalité qu'il existe entre horizon optique (ou géométrique) et horizon radioélectrique. Dans une atmosphère standard, les trajectoires des ondes sont légèrement courbées vers le haut, ce qui implique une distance de propagation légèrement supérieure à celle attendue par des considérations purement géométriques (le rapport est de 4/3).

D'un point de vue général, tout consiste à comparer les valeurs d'indice de réfraction avec la courbure apparente de la Terre. Le rayon terrestre fictif ae ($4/3$ de a dans des conditions standards) est choisi de telle façon que, en comptant les altitudes à partir de cette surface terrestre fictive, les trajectoires soient rectilignes. Cette nouvelle surface terrestre est donc, supposée, placée dans une atmosphère d'indice constant. Quatre cas de figure apparaissent d'un point de vue théorique :

1. $dN/dz = -39$ unités N/km, l'atmosphère est dite normale dont le gradient vertical est constant. Pour une telle atmosphère, le coefficient multiplicateur du rayon terrestre est de $4/3$ et le rayon apparent de la Terre est de 8500km.
2. $dN/dz > -39$ unités N/km, il y a infraréfraction, les trajectoires sont moins courbées et le rayon apparent de la Terre est inférieur à 8500 km. En particulier si le gradient est nul, l'atmosphère est linéaire, les trajectoires sont des droites. Si le gradient est positif, le rayon apparent de la Terre est inférieur à son rayon réel.
3. $dN/dz < -39$ unités N/km, il y a superréfraction, les trajectoires sont plus courbées et le rayon apparent de la terre est supérieur à 8 500 km. En particulier si le gradient est inférieur à -157 unités N / km , la courbure des trajectoires est supérieure à la courbure terrestre, les trajectoires ne s'éloignent donc pas indéfiniment du sol, elles y reviennent et y sont en général réfléchies. Il peut y avoir propagation guidée.

4. Dans le cas où $dN/dz < -157$ unités N/km, les équations montrent que seules les trajectoires dont l'angle d'incidence dans le conduit est inférieur ou proche de quelques degrés seront guidées dans ce dernier. On peut écrire par ailleurs que l'angle d'incidence maximum s'exprimant en milliradians sur la base de la variation de l'indice M (ΔM - Unité M) entre le haut et le bas du conduit troposphérique comme :

$$\varphi_{max} = \sqrt{2\Delta M} \quad (\text{millirad})$$

Il est possible d'assimiler la valeur ΔM à la « force » (§1.2) du conduit et cette valeur peut se calculer aussi simplement que par la multiplication du gradient du co-indice de réfraction par la largeur du canal. Comme dans un guide métallique, une onde ne peut être guidée que si la hauteur du guide troposphérique est suffisante. Cependant, pour ce dernier, la hauteur doit être beaucoup plus grande. On peut montrer de façon approximative que la hauteur minimale est égale à :

$$H_{min} = \frac{\lambda}{2\varphi_{max(\text{rad})}} = \frac{\lambda}{2\sqrt{2\Delta M}} \times 10^3 \quad (m)$$

Compte tenu des valeurs habituelles de φ_0 (autour de 1 à 5° soit de 17 à 87 millirads), la hauteur d'un guide troposphérique doit être supérieure d'environ 40 à 180 fois la longueur d'onde, ce qui est pratiquement toujours réalisé en ondes centimétriques et plus courtes. Dans [4], l'expression est toutefois améliorée et λ_{max} , c'est-à-dire la longueur d'onde maximum qui peut être transportée dans un conduit de propagation s'exprime comme :

$$\lambda_{max} = \frac{2}{3} CH\sqrt{\Delta M} \quad (m)$$

Avec l'introduction d'une constante C qui varie en fonction du type de conduit. $C = 3.77 \times 10^{-3}$ pour des conduits surfaciques et $C = 5.66 \times 10^{-3}$ dans le cas des conduits élevés. Il convient toutefois de noter que λ_{max} est une estimation, car la fréquence de coupure d'un conduit (contrairement à celle d'un guide) ne peut être définie précisément. Les longueurs d'onde supérieures à λ_{max} peuvent aussi être guidées légèrement (avec des pertes notablement supérieures). De plus le conduit n'est pas un guide parfait et pour les longueurs d'onde inférieures à λ_{max} une partie de l'énergie EM fuit à travers le guide. Les deux expressions décrites ci-dessus sont très proches et seules les constantes multiplicatives diffèrent (bien qu'elles soient aussi relativement proches).

D'autres études expérimentales, corroborent le fait que fréquence de coupure d'un conduit se situe autour d'une gamme de fréquences. Des modélisations sur la base de solution « full wave » ont montré que la propagation des ondes dans ces conduits se faisait avec de pertes minimales (notamment pour les modes non couplés à la terre). Cependant, le coefficient de perte α (dB/km) le long du chemin de propagation augmente très rapidement lorsque la fréquence approche la fréquence critique dite de « coupure ». Cette fréquence a été estimée dans [5] et [6] comme :

$$f_{min} = \frac{1572}{H_{(m)}^{1.8}} \quad (GHz)$$

Dans la pratique si l'on effectue un sondage vertical pour mesurer l'indice de l'air en fonction de l'altitude, la courbe obtenue est assez complexe, il peut y avoir des conditions d'infraréfraction entre certaines altitudes et de superréfraction entre d'autres. Il peut exister des phénomènes de propagation guidée en altitude. Si l'on compare des sondages verticaux effectués à la même heure en deux points distants de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres, on constate que les situations de superréfraction, lorsqu'elles existent, s'étendent sur des zones très grandes (elles correspondent, en effet, à des situations météorologiques stables), mais par contre les situations l'infraréfraction sont peu étendues (elles correspondent à des situations météorologiques instables).

2.2 Les différents types de conduits de propagation

Les conduits atmosphériques peuvent générer un évanouissement profond et lent, un renforcement important du niveau du signal et un évanouissement par trajets multiples sur les liaisons de Terre en visibilité directe. Ces conduits peuvent aussi être à l'origine de brouillages importants sur les trajets transhorizons. Il est donc intéressant de décrire la fréquence d'apparition des conduits ainsi que leur structure. Les valeurs représentées par la suite, sur la métropole (Fig.6, Fig.7 et Tab.2) sont extraites des données de mesure associées à la **Recommandation UIT-R P.453-6**, élaborées sur 20 années (1977-1996) d'observations radiosonde provenant de 661 sites répartis dans le monde entier. Il existe globalement quatre types de conduit [7]:

1. Des conduits d'évaporation : Le conduit d'évaporation est un phénomène quasi permanent à la surface de la mer. L'évaporation de l'eau à la surface crée un fort gradient d'humidité qui se traduit par un fort gradient négatif de M qui décroît rapidement. C'est donc sur les premiers mètres que le conduit d'évaporation fait effet de guide d'onde avec la surface de mer, l'onde étant successivement courbée vers la surface par la couche de gradient d'indice négatif puis réfléchi sur la surface de mer. La hauteur du conduit d'évaporation est par définition la hauteur à laquelle dM/dz s'annule. La hauteur moyenne mondiale des conduits d'évaporation est de 13 mètres, pour des moyennes locales de 5 mètres aux hautes latitudes et de 16 mètres dans les zones tropicales. La probabilité de trouver un conduit supérieur à 30 mètres est très faible et chute quasiment à zéro pour une hauteur supérieure à 40 mètres
2. Des conduits de surface : Les conduits de surface apparaissent lorsque l'air dans l'atmosphère est extrêmement chaud et sec en comparaison de l'air à la surface du sol. Ils peuvent donc avoir plusieurs origines :
 - Sur mer, ils sont liés à l'advection d'un air chaud et sec provenant des terres vers la mer. Il y a alors présence d'une couche d'air dans laquelle les propriétés météorologiques sont différentes de l'atmosphère marine environnante. La chute de l'humidité et l'élévation de la température entraînent un fort gradient négatif d'indice à l'intérieur du conduit, ce qui engendre des conditions de propagation guidée entre le conduit et la surface de mer similaires à ce qui se passe dans un guide d'onde. Le conduit de surface est un événement plus rare que le conduit d'évaporation, puisque son pourcentage d'occurrence est de 15 % sur l'ensemble du globe. Ce pourcentage peut néanmoins atteindre 50 % dans le Golfe Persique. Les effets du conduit de surface sont cependant plus importants que ceux du conduit d'évaporation et il convient de noter que ces conduits peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres et être particulièrement persistants dans le temps (plusieurs jours).
 - Sur terre, ils sont apparentés à une inversion des températures de surface durant les phases nocturnes (pour plus de précision, voir §1.6) [3] [7]. Des conduits de surface peuvent aussi apparaître par dispersion de l'air froid sous des conditions orageuses.D'un point de vue général, les conduits de surface sont associés au temps clair et donc plutôt aux saisons où les mois présentent des températures chaudes.
3. Des conduits de surface élevée ou conduit de surface (parfois « S schape » lorsqu'ils répondent à certains critères) dont les caractéristiques de formation sont proches de ceux des conduits surfaciques.
4. Et des conduits élevés : le conduit surélevé est en général dû à une translation verticale d'un conduit de surface ou il peut aussi résulter de conditions de haute pression (anticyclone) durant lesquelles il existe une large subsidence d'air chaud vers le sol (§2.6) (la subsidence en météorologie est le déplacement d'air vers le sol dans l'atmosphère. Il peut s'agir d'un lent affaissement d'une masse d'air sur une vaste région dans un anticyclone). Contrairement à un conduit de surface, un conduit surélevé a son minimum en M au niveau du sol. Il peut ainsi être modélisé de la même façon par un conduit trilineaire avec une base en général de plusieurs centaines de mètres.

D'un point de vue de leur représentation, comme démontré sur la Fig.5, les différents conduits sont paramétrés en fonction de la valeur minimum de leur co-indice de réfraction et de la zone où se situe l'inversion de co-indice. Pour les conduits de surface, l'inversion se fait au niveau du sol. Ce qui distingue un conduit de surface élevé, d'un conduit élevé est la valeur du co-indice de réfraction au sol. Il doit être supérieur à la valeur minimum qui définit le haut du conduit dans le cas du conduit de surface élevé et inférieur dans le cas du conduit élevé.

Dans [8], la distinction entre les conduits de surface et/ou d'évaporation et les conduits élevés se fait par l'intermédiaire de la position de la couche définissant la limite basse du conduit : surface du sol pour le premier, au-dessus de la surface du sol pour le second (l'inversion est au sol ou proche du sol). Pour les conduits élevés, celle-ci se situe à plus de 100m du sol alors que le minimum de valeur de co-indice de leur profil se situe au sol.

Il convient de noter que dans de nombreux ouvrages, les conduits de surface et d'évaporation sont communément associés à une propagation par « ducting » alors que les conduits élevés peuvent aussi être référencés comme des « couches de réflexion/réfraction », c'est notamment le cas dans la **Recommandation UIT-R P.452-15**.

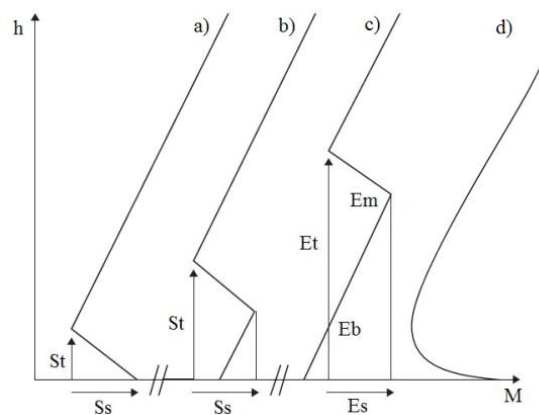
Le terme « guide d'onde » associé à des conduits de propagation ne peut se comprendre que par des similitudes géométriques. La propagation dans un conduit pourrait être assimilée à celle qui se produit dans un guide d'onde (présentant un certain nombre d'états de résonances – ou modes TE, TM ou TEM), mais sa mise œuvre est

complexe. De façon plus simple, la propagation dans un conduit est considérée comme se faisant par multiple réflexion sur les surfaces du conduit [3]. Ces dernières sont en fait des couches limites qui guident le signal. Ces deux types de conduits (de surface ou élevé) n'engendrent pas tout à fait les mêmes mécanismes de propagation, même si la modélisation de leur perte reste dans la plupart des modèles, identiques.

Du fait du faible nombre de conduits de surface élevée par rapport au nombre de conduits de surface, les statistiques données dans la **Recommandation UIT-R P.453-6** combinent ces deux types de conduits en un seul groupe appelé conduit de surface. Il convient de noter que cette association est assez spécifique de la recommandation, dans de nombreuses publications, les conduits de surface élevés sont apparentés à des conduits élevés (notamment dans [8] [9] et [11])

Dans la **Recommandation UIT-R P.453-6**, les conduits de surface sont caractérisés par leur intensité S_s (unités M) ou E_s (unités M) (s pour « strength ») et leur épaisseur St (m) ou Et (m) (t pour « thickness »). Par ailleurs pour les conduits élevés, deux paramètres supplémentaires sont utilisés pour les caractériser, à savoir : l'altitude de la partie inférieure du conduit E_b (m) (b pour base) et E_m (m) (m pour maximum), altitude pour laquelle le conduit présente une valeur maximale M.

Figure 5 : Définition des paramètres décrivant: a) les conduits de surface, b) les conduits de surface élevés ou « S shape », c) les conduits élevés et d) les conduits d'évaporation



Comme il l'a été présenté ci-dessus, il existe une distinction entre les conduits de propagations et les couches de réflexion/réfraction. Ceci s'explique assez aisément par deux faits distincts et indépendants :

1. Dans la plupart des cas, il n'est pas possible d'atteindre [11] des conditions de superréfraction sur des zones suffisamment étendues sur terre pour qu'ils y aient une véritable propagation guidée.
2. Les conduits élevés sont généralement à une altitude trop haute pour que les ondes EM puissent pleinement s'y coupler et elles ont dès lors tendance à ce réfléchir sur leur base.

Tableau 2 : Ordre de grandeur des éléments caractérisant les conduits de propagation (élevés ou surfaciques) au-dessus de la France. Valeur estimée à partir des Figures A5 à A8 données en Annexes. La colonne en moyenne fait référence à la région Centre

Eléments	Conduits de surface			Conduits élevés		
	Minimum	En moyenne	Maximum	Minimum	En moyenne	Maximum
Pourcentage de temps (%)	2	6	12	2	7	12
Force ($\Delta M = dM/dz \times dz$)	6	8	9	8	8	8
Épaisseur moyenne (m) (dz)	50	60	80	170	180	195
Hauteur Base (m) *	0 (sol) **	0 (sol) **	0 (sol) **	1080	1100	1120

*La hauteur de base dans la P.453 est une moyenne des hauteurs donnée pour une année moyenne.
 **La base des conduits de surface se situe au sol, toutefois les éléments relatifs à ce type de conduit sont associés à ceux des conduits de surface élevés dont la base se situe généralement entre 50 et 100 m du sol.

Il faut noter que les probabilités d'apparition des conduits, ne peut pas être assimilé à la probabilité de propagation par conduit, car la présence d'un conduit ne signifie pas nécessairement le couplage entre une onde EM provenant d'un émetteur et ce dernier. C'est d'ailleurs pour cela que le paramètre β_0 (%) de la P.452 doit être ajusté en fonction de différents paramètres (rugosité du trajet, type de chemin, etc... – voir § 3)

Les deux figures suivantes (Fig.6 et Fig.7) donnent respectivement les représentations statistiques (élaborées à partir de mesures) de l'apparition de conduits de surface et des conduits élevés au-dessus de la France. Celles-ci montrent clairement que la probabilité de trouver des conduits de surface (ou de surface élevé) ou des conduits élevés au-dessus de la France est de l'ordre de 4 à plus de 12% du temps. La progression de la probabilité se fait d'est en ouest dans les deux cas. Les localisations associées au même pourcentage de temps sont quasiment identiques pour les deux types de conduit. Les autres figures permettant l'obtention des valeurs du Tab.2 sont accessibles dans les Annexes de ce document.

Figure 6 : Evolution de la probabilité (% du temps moyen annuel) de trouver des conduits de surface au-dessus de la France / Europe

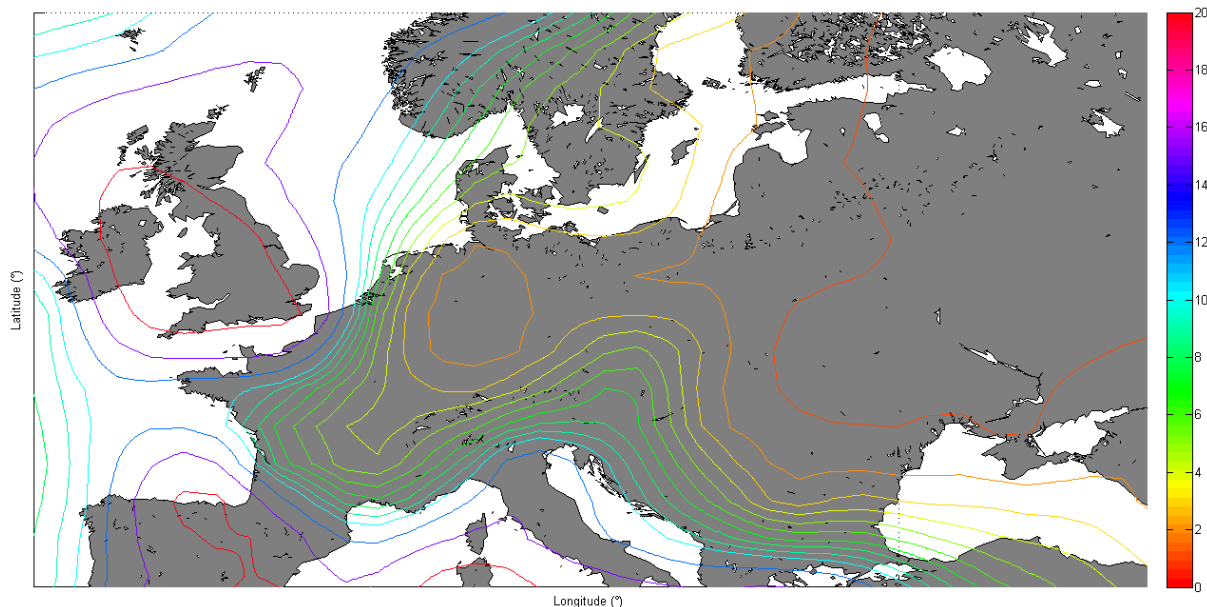
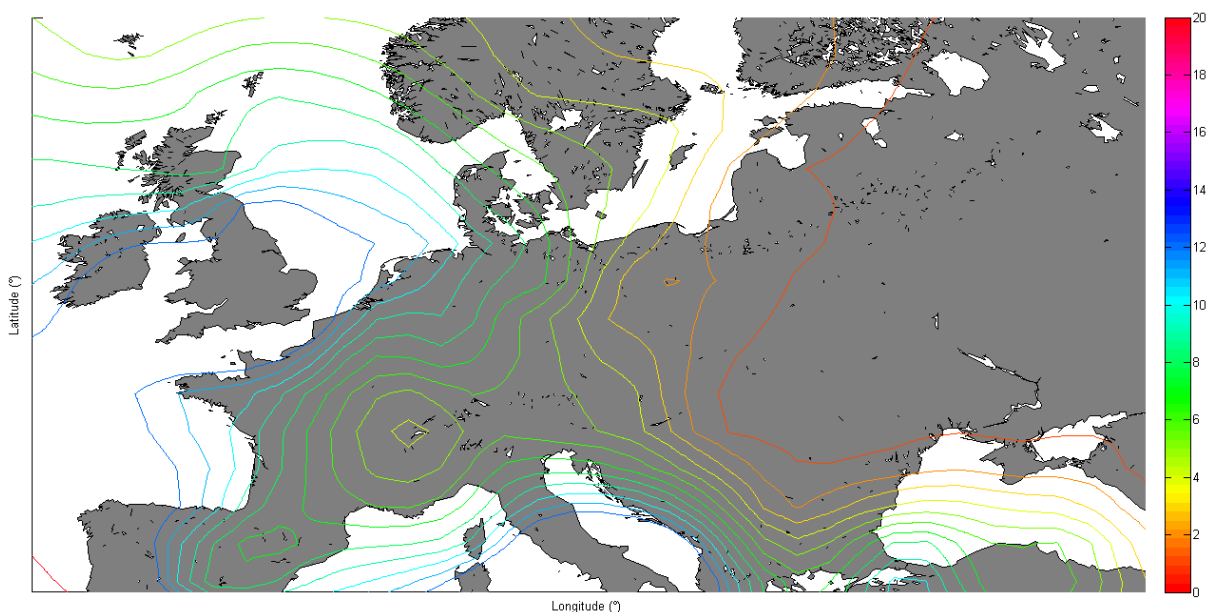


Figure 7 : Evolution de la probabilité (% du temps moyen annuel) de trouver des conduits élevés au-dessus de la France / Europe



Tout comme la **Recommandation UIT-R P.453-6**, [9] fait un état des lieux de l'occurrence du « ducting » et des hauteurs moyennes des conduits au-dessus de l'Europe. Les données présentées paraissent beaucoup plus précises que celles de la **Recommandation** car elles sont associées à des heures du jour et à des saisons. Ces éléments permettent d'apprendre notamment que sur le continent européen, la base moyenne de tous conduits confondus se situe généralement en dessous de 70 m entre 18h00 et 0H00 (la nuit) quelle que soit la saison. Lors du lever du soleil (aux alentours de 6h00 UTC pour les pays de l'Est de l'Europe), la base des conduits s'élève pour atteindre de 100 à 250m. Toutefois, cette valeur doit être prise avec précaution car [9] montre aussi que les conduits de propagation ont plutôt tendance à apparaître la nuit quelle que soit la saison (les mesures montrent qu'aucun conduit n'apparaît sur l'heure de midi). Il convient par ailleurs de noter que les données de mesure de [9] sont en parfait accord avec les données expérimentales décrites dans [10] effectuées dans l'Est de l'Europe (République Tchèque) durant la nuit.

Si les probabilités d'apparition des conduits dans la **Recommandation UIT-R P.453-6** et dans [9] pour la zone Europe sont particulièrement semblables, en revanche les données relatives aux hauteurs moyennes de la base des conduits présentées dans [9] peuvent paraître, pour le lecteur averti, différentes de celles présentées dans la **Recommandation**. Ceci s'explique assez aisément par deux faits distincts :

1. Tout d'abord [9] ne fait pas de distinction entre les différents types de conduits et donne donc une évolution moyenne de la base des conduits (tous confondus).

- Des hypothèses amenées par [11] et [5] laissent supposer que les relevés des radiosondes soient entrepris et collectés deux fois par jour (00h00 et 12h00). Ce qui laisse entrevoir une surestimation ou une sous-estimation de la probabilité, mais aussi de la hauteur moyenne de la base des conduits de propagation pour les données de la **Recommandation UIT-R P.453-6**. Une étude rapide des données de [10] montre assez bien qu'en moyenne la hauteur des conduits est comprise entre 500 et 1500 m sur l'heure de midi en fonction des saisons et qu'en revanche, elle est inférieure à 50 m à 00h00 quelle que soit la saison. Ces valeurs paraissent en adéquation avec celles données par la **Recommandation UIT-R P.453-6**.

2.3 Les données radio climatiques nécessaires à la modélisation des conduits de propagation

Sur la base de ce qui a été exprimé précédemment, la plupart des modèles de propagation semi-déterministe et/ou empiriques considèrent deux grands facteurs radio climatiques pour prendre en considération l'apparition des conduits de propagation sur un chemin donné :

- Les statistiques du gradient moyen de l'indice de réfraction (ΔN) dans la couche la plus basse de l'atmosphère. Elles constituent des paramètres importants pour calculer le dégagement du trajet et les effets de propagation associés : formation de conduits sur les trajets transhorizon, réflexions sur la surface de la Terre ainsi qu'évanouissement et distorsion par trajets multiples sur les liaisons de Terre en visibilité directe. Ce paramètre permet de calculer la force du conduit. L'évolution du gradient moyen de l'indice de réfraction s'appuie principalement sur sa mesure dans une couche de 1 km au-dessus du sol. Les données relatives à ces mesures sont représentées sur des cartes (dans la **Recommandation UIT-R P.452**, les données numériques sont accessibles sous la forme DN50.TXT)
- Les statistiques de gradients du co-indice (dN_1) pour les 100 premiers mètres à partir de la surface de la Terre. Elles servent à évaluer avec une précision raisonnable la probabilité de formation/présence de conduits ou de trajets multiples [11]. Cette formation de conduits est d'autant plus forte que la variation de dN_1 est supérieure à 100 unités N/km. C'est donc cette valeur seuil qui sert à établir les probabilités (désignées par le terme β_0 dans la **Recommandation UIT-R P.452**). La **Recommandation UIT-R P.453**, donnent, par l'intermédiaire de carte, l'évolution statistique de cet élément pour l'ensemble de la planète. Ces données ont été établies à partir d'un ensemble de données sur 5 ans (1955-1959) provenant de 99 sites de radiosonde. Toutefois, ces éléments ne sont pas disponibles sous forme numérique. À défaut d'utiliser le gradient dans les 100 premiers mètres, son équivalent dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère est tout aussi pertinent. Dans le cadre de la **Recommandation UIT-R P.453**, les fichiers de données numériques sont disponibles (DNDZ_xx.TXT – xx représentant le pourcentage de temps – les données sont disponibles pour 1, 10, 50, 90 et 99% du temps sur l'ensemble du globe). Ces éléments ont été établis à partir de données d'initialisation (4 fois par jour) sur deux ans (1992-1993) provenant des prévisions météorologiques numériques du CEPMMT (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme).

Tableau 3: Ordre de grandeur du gradient de co-indice (dN_1) pour les 65 premiers mètres à partir de la surface de la Terre pour différents pourcentages de temps annuel au-dessus de la France. Valeur estimée à partir des Figures A1 à A4 données en Annexes

Pourcentage de temps	Valeur approximative (Unité N/km) / (Unité M/km)			Valeur Critique	Propagation
	Minimum (Landes/PACA)	En Moyenne (Centre)	Maximum (Bretagne)		
1%	-400 -243	-290 -133	-200 -43	<-157 <0	Propagation guidée (PG)
10%	-200 -43	-130 27	-110 47	<-157 et de -157 à -79 <0 et de 0 à 79	PG & Super-réfraction
50%	-60 97	-48 109	-40 117	-79 à 0 / (-39) 79 à 157	Normal/Standard
90%	-35 122	-20 137	-15 132	-79 à 0 / (-39) 79 à 157	Normal/Standard

Les données extraites de la **Recommandation UIT-R P.453** sont donc assez claires et montrent donc que l'on peut considérer que la troposphère au-dessus de la plupart des régions de France (et plus particulièrement celles en bordure de littoral – Landes et PACA) présente des indices de réfractons permettant l'apparition de phénomènes de propagation guidée et/ou de superréfraction pendant au moins 10% du temps.

Si l'évolution de l'indice de réfraction en fonction de l'altitude est parfaitement admise, il convient toutefois de considérer aussi que son évolution le long du chemin de propagation est aussi possible (évolution dans la longueur). En règle générale, les courbes « d'iso-indice » ne sont pas parallèles au sol et peuvent former des figures géométriques en deux dimensions plus ou moins complexes. Pour ce type de configuration, le vent et le relief environnant jouent des rôles prépondérants [2]. Ces configurations complexes ne seront pas étudiées, mais contribuent sans aucun doute à la génération de pertes supplémentaires dans les conduits.

Figure 8 : Gradient du co-indice dN , non dépassé pendant 1% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère. Donnée relevée par la mesure pour l'ensemble du globe. (Unité N/km)

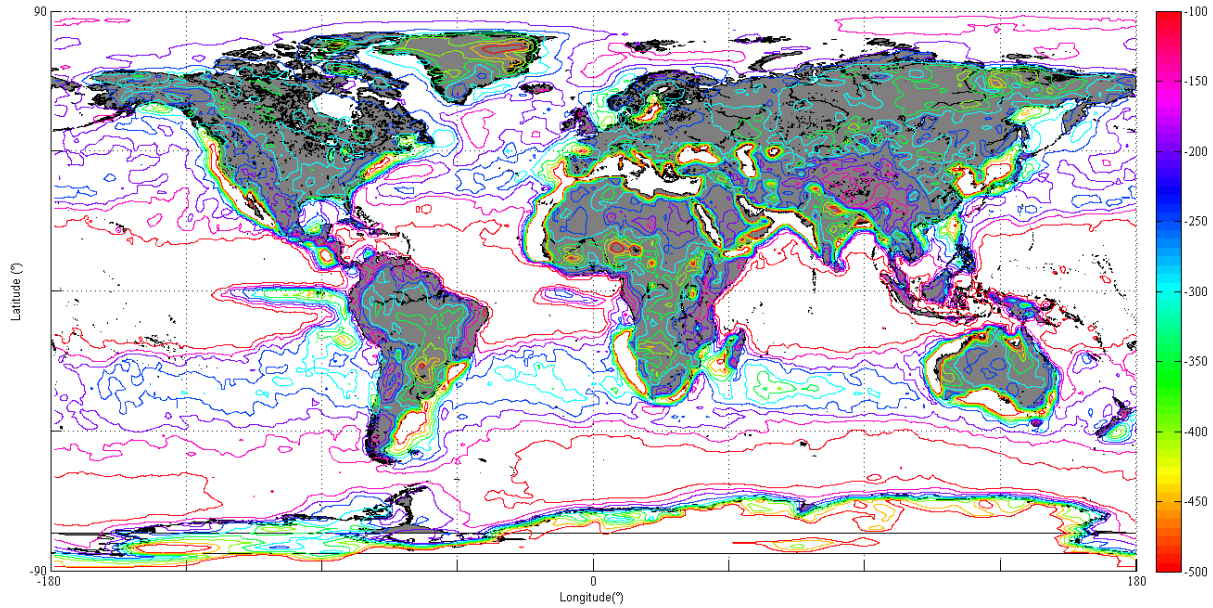
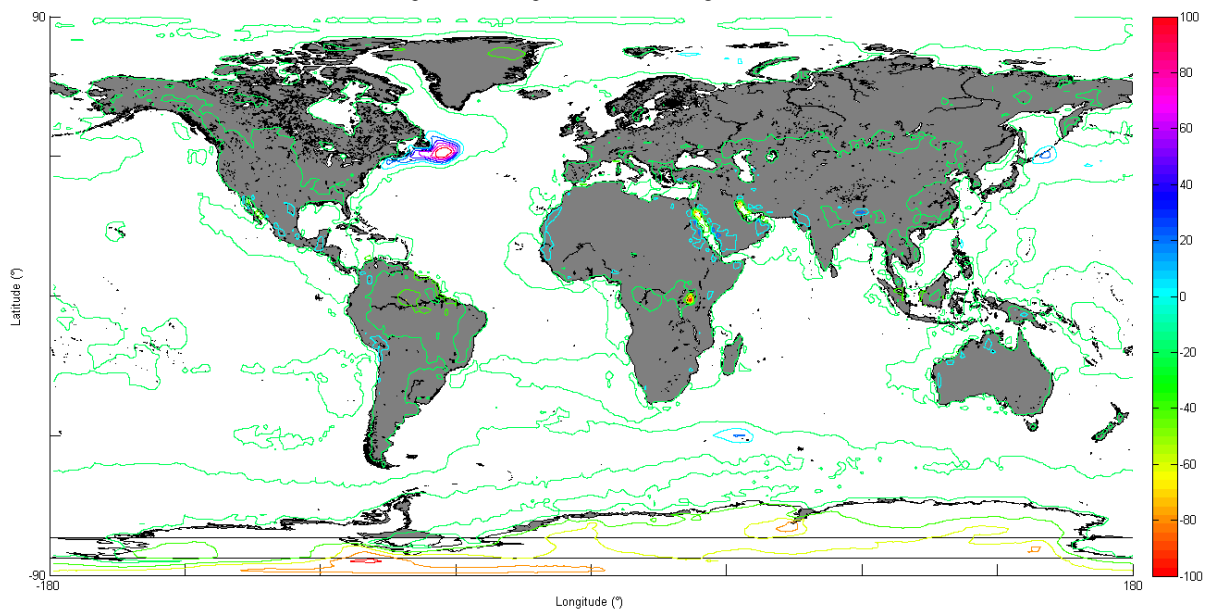


Figure 9 : Gradient du co-indice dN , non dépassé pendant 90 % d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère. Donnée relevée par la mesure pour l'ensemble du globe. (Unité N/km)



2.4 La propagation dans les conduits

2.4.1 Couplage d'une onde dans un conduit

En utilisant la théorie des rayons pour illustrer la situation entre deux strates d'indice de réfraction modifié (M), il est possible de comprendre les mécanismes de couplage entre l'onde et le conduit de propagation (surfactive ou élevé) [6].

- Si l'onde présente un angle d'incidence dans le conduit supérieur à φ_{max} , elle peut se propager vers des points hors du conduit.
- Si l'onde présente un angle d'incidence dans le conduit inférieur à φ_{max} , elle est alors piégée dans le conduit
- une onde extérieure au conduit, présentant un angle d'incidence proche de zéro (tangentielle au conduit) peut aussi être piégée, si son angle d'incidence est supérieur, elle traverse le conduit.

Ces éléments permettent de comprendre notamment que le couplage entre une onde et un conduit est favorisé si le conduit se situe plus particulièrement sur l'horizon radioélectrique de l'émetteur et que le couplage est plus accessible par les extrémités du conduit, que par son centre [3].

De plus, la théorie des rayons implique aussi qu'une onde originellement en dehors et en dessous du conduit ($\Delta M/\Delta h > 0$) ne peut pas être piégée dans ce dernier. Des investigations entreprises dans [12] montrent que les effets de la propagation par conduit ne se limitent pas aux liaisons terrestres et peuvent aussi influencer les liaisons terre-ciel ou ciel-terre notamment au-dessus des mers. Sur ce type de liaison la distribution statistique de l'amélioration de la force du signal due la présence de conduit de propagation suit une loi gaussienne dont le maximum se situe aux alentours de 7dB d'amélioration du signal pour un pourcentage de 15 à 20 % du temps.

2.4.2 Les pertes dans les conduits

Lorsque le signal source et le récepteur sont totalement immergés dans le conduit, le signal se propage avec des pertes très faibles [6]. Par exemple dans les conditions d'atmosphère stratifiée standard, les pertes estimées pour les 4 premiers modes de propagation sont de l'ordre de 0.1 dB/km. D'autres méthodologies de calcul ont montré que ces pertes pouvaient être inférieures à 0.03 dB/km pour le premier mode. Dans [6], l'expression des pertes entre un émetteur et un récepteur dans le canal est donnée comme :

$$L_b \geq 92.45 + 20 \log(f) + 10 \log(d) + \alpha d + \sum A \text{ (dB)}$$

où f est la fréquence en GHz (32.45 à la place de 92.45 pour une fréquence en MHz – et cette fréquence doit être supérieure à f_{min} §1.1), d la distance en km et α l'affaiblissement linéique. Cette équation est proche de celle qui régit l'espace libre. Elle reste valable si l'émetteur et le récepteur sont dans le conduit. L'expression $10 \log(d)$ permet de rendre compte des contraintes énergétiques dans le plan vertical. Si les modes de propagation modélisés sont détachés de la surface de la Terre, α peut être pris égal à 0.03dB/km. Dans le cas où des modes amenant des réflexions sur le sol devaient être considérés, les pertes α pourraient être beaucoup plus grandes. D'un point de vue pratique, si les émetteur et récepteur ne sont pas dans le conduit, le terme de somme dans l'équation peut être remplacé par la somme des contributions des pertes de couplage au milieu qui sont approximées par :

$$A_c = -10 \log\left(\frac{2|\varphi_{max}|}{\vartheta}\right) \text{ (dB)} \quad 2|\varphi_{max}| < \vartheta$$

$$= 0 \quad 2|\varphi_{max}| > \vartheta$$

où le terme ϑ donne la largeur du faisceau de l'antenne à 3dB. D'autres pertes sont aussi accessibles si les émetteur/récepteurs sont au niveau (en élévation) du conduit mais bien au-delà de son extension horizontale. Dans ce cas le terme $2|\varphi_{max}|$ est remplacé par D/d_l où D est la largeur du conduit et d_l la distance entre le terminal et la fin du conduit. Lorsqu'un des deux ou les deux terminaux sont en dehors et sous le conduit, les pertes décrites précédemment ne sont plus suffisantes. Elles doivent être associées à des pertes de couplage intérieur/extérieur, aux positions où le trajet de propagation intercepte le conduit. Généralement ces pertes de couplage obtenues par différentes méthodologies de calcul sont de l'ordre d'une dizaine de dB (voir inférieure). Ces valeurs ont été validées par des données mesurées. Dans [13], les mesures entreprises au-dessus de la mer sur un chemin de plus de 230 km montre clairement que les pertes de propagation sont parfois inférieures à celles de l'espace libre et, surtout, que leur valeur est atteinte entre 25 et 45 % du temps selon les mois d'été considérés par l'étude.

2.4.3 Exemple de propagation et de trajectoire dans les conduits

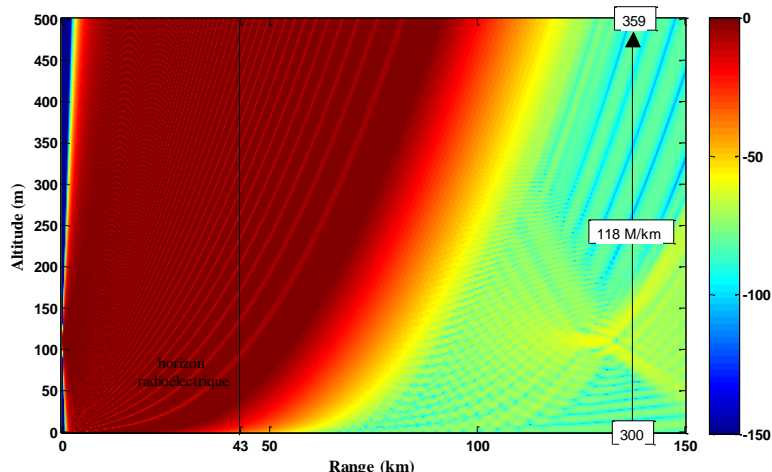
Les modélisations purement déterministes (voir §3) et plus particulièrement celles basées sur la résolution de l'équation de propagation permettent d'obtenir la répartition des champs électromagnétiques sur un chemin de propagation déterminé.

Cette partie a pour volonté de donner une représentation visuelle du comportement des ondes dans différentes configurations d'atmosphère. Si les modélisations purement déterministes permettent cette représentation (souvent nécessaire à la compréhension), elles ont toutefois comme désavantage de donner des résultats dans des conditions plus ou moins « parfaites » (évolution stratifiée de l'indice de réfraction uniquement sur l'altitude – pas d'évolution sur la distance, sol considéré uniformément comme un conducteur parfait ou une surface à impédance constante, etc...). Dans la nature, ces conditions sont rarement réalisées. Dans l'ensemble des exemples qui vont être présentés, les antennes sont considérées comme fonctionnant à 2.6 GHz, avec une ouverture de faisceau à 3dB de 3° non tilté. Résultats obtenus à l'aide de PETOOL © [23] sous Matlab.

2.4.3.1 Atmosphère standard : Cas sans profil de terrain

Ce premier cas de figure, particulièrement simple permet de bien comprendre la notion d'horizon radioélectrique dans une atmosphère standard (118 M/km). L'antenne est située à 112m du sol. Pour cette hauteur, considérant un terrain plat, l'horizon optique (ou géométrique) se situe à 38 km alors que l'horizon radioélectrique fonction de l'indice de réfraction de l'atmosphère est à environ 43km de l'antenne. La représentation du facteur de propagation (perte relative par rapport aux pertes en espace libre) de La Fig.10 montre clairement les courbures des trajectoires dans une atmosphère standard. L'évolution de ce facteur n'est pas sans rappeler les éléments décrits dans la Fig.3. Globalement jusqu'à l'horizon, les pertes de propagation sont liées à celles de l'espace libre, puis s'ajoutent les pertes par diffraction sur la sphéricité de la terre et enfin les pertes troposphériques pour les ondes qui ont été diffractées. Au final, l'ensemble de ces éléments ajoute une centaine de dB de pertes supplémentaires à celles de l'espace libre.

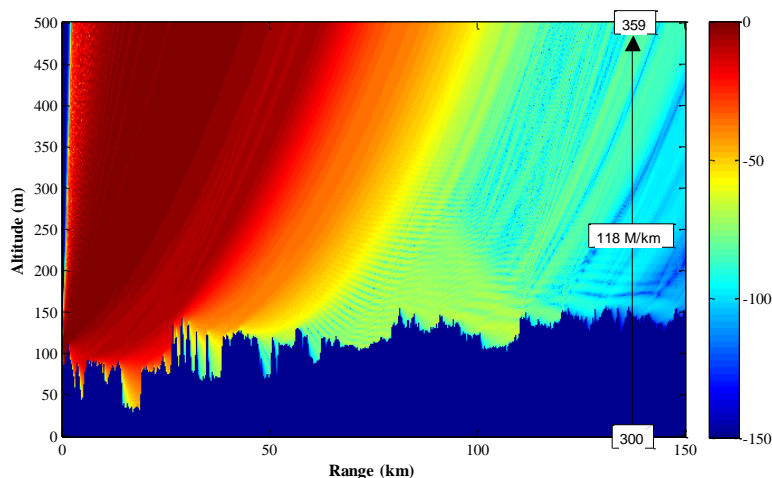
Figure 10 : Facteur de propagation dans le cas idéal sans profil de terrain /



2.4.3.2 Atmosphère standard : Cas avec profil de terrain

Le profil de terrain utilisé est un profil réel extrait des SRTM de la NASA sur un chemin de propagation de 154 km entre Boissy-Saint-Léger dans la région parisienne et le grand radiotélescope de Nançay. L'antenne est située à 23m au-dessus du sol dans une zone où ce dernier est à 89m au-dessus du niveau de la mer (l'antenne est donc à 112 m au-dessus du niveau de la mer). Les Fig.11, 12 et 13 (grossissements de la Fig.11 et changement d'échelle de la légende) laissent clairement entrevoir que l'utilisation de la modélisation basée sur la résolution de l'équation de propagation prend en compte l'ensemble des phénomènes associés à la propagation (diffraction et réflexion sur des éléments du terrain – Fig.13).

Figure 11 : Facteur de propagation dans le cas d'une atmosphère standard avec profil de terrain



Dans le cas d'une atmosphère standard et dans la configuration de l'antenne utilisée, le radiotélescope de Nançay recevrait les ondes provenant de l'émetteur avec une atténuation de l'ordre de 150 dB supplémentaire à celle de l'espace libre.

Figure 12 : Facteur de propagation dans le cas d'une atmosphère standard avec profil de terrain (zoom de la Fig. 11 sur une zone réduite sur 50 km)

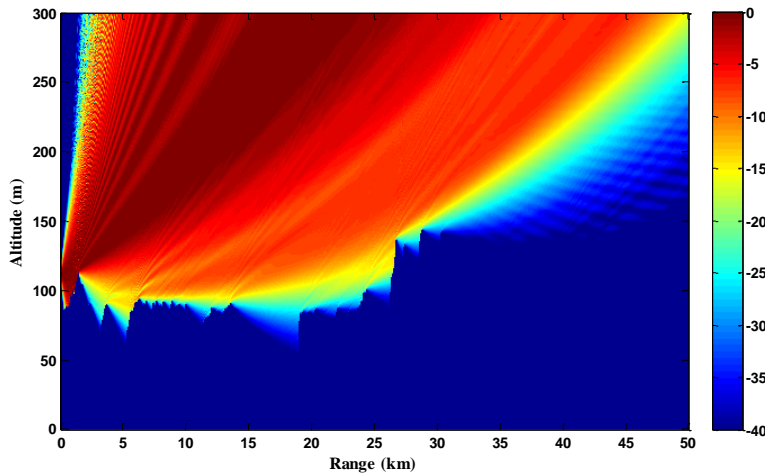
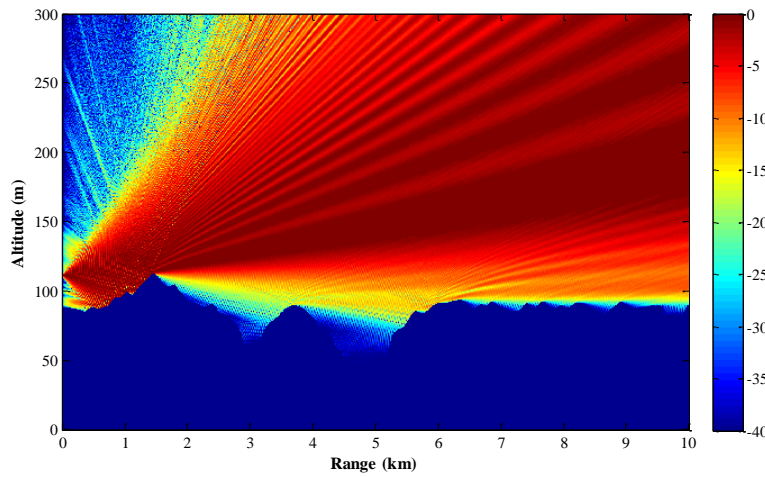


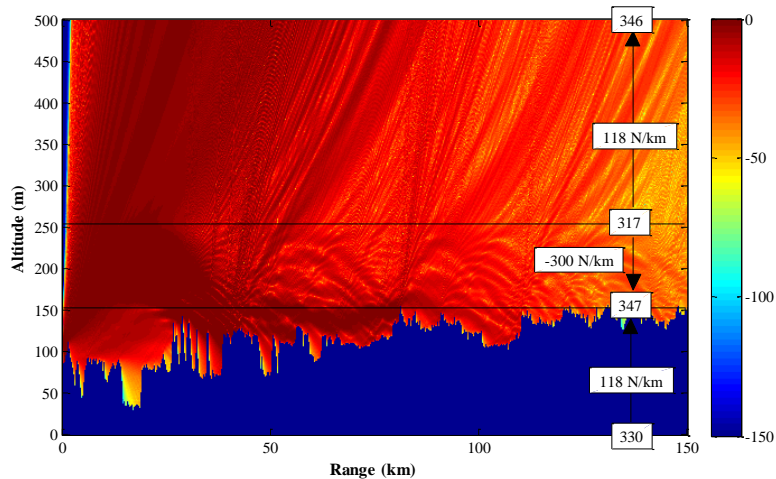
Figure 13 : Facteur de propagation dans le cas d'une atmosphère standard avec profil de terrain (zoom de la Fig. 11 sur une zone réduite sur 10 km)



2.4.3.3 Conduit de surface élevé : Cas avec profil de terrain

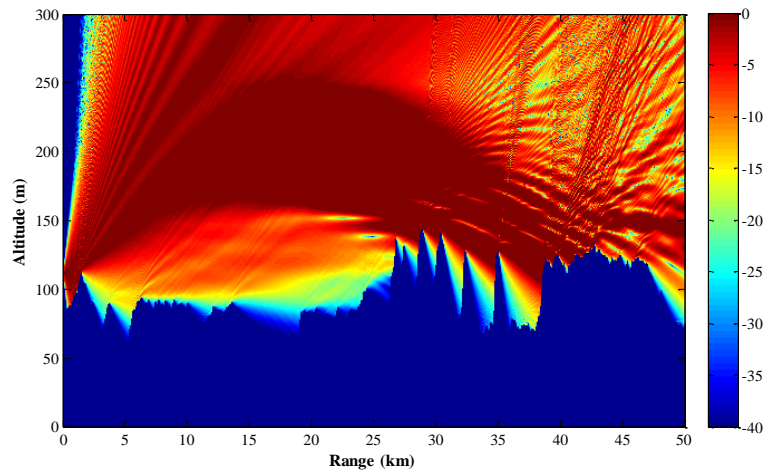
Dans cette partie, l'atmosphère est constituée d'une inversion d'indice de réfraction entre les couches d'altitude 150 m et 250 m. les autres hypothèses restent identiques à celles qu'elles sont dans les parties précédentes.

Figure 14 : Facteur de propagation dans le cas d'une propagation par conduit de surface élevé



Les Fig.14 et 15 rendent les résultats pour ce type de structure atmosphérique. La comparaison de ces résultats avec ceux simulés dans une atmosphère standard (§2.4.3.2) montre clairement que les champs ne sont quasiment pas atténués au-delà de l'atténuation relative à l'espace libre sur une grande partie du parcours. Les deux figures montrent bien la courbure des trajectoires lors du passage à proximité de la couche d'inversion, ainsi que les rebonds successifs des ondes. Comme décrit dans la section 2.2, la propagation engendrée par les conduits surfaciques ou de surface élevés est bien de type guidé.

Figure 15 : Facteur de propagation dans le cas d'une propagation par conduit de surface élevé (zoom de la Fig. 14 - zone réduite sur 50 km)



2.4.3.4 Conduit élevé : Cas avec profil de terrain

Dans cette partie, l'atmosphère est constituée d'une inversion d'indice de réfraction entre les couches d'altitude 1000 m et 1200 m (en adéquation avec les données des Annexes). Les Fig.16 et Fig.17 rendent les résultats pour ce type de structure atmosphérique.

La comparaison de ces résultats avec ceux simulés dans une atmosphère standard (§2.4.3.2) montre clairement que les champs connaissent une atténuation relative de l'ordre de 50 à 70 dB par rapport à celle calculée en l'espace libre dans le cas où la couche d'inversion est située très haute dans la troposphère. Le couplage avec le conduit est modéré.

Dans un cas où cette couche est plus basse, la propagation peut se faire sans perte additive (Fig.17) et suivant la géométrie relative du conduit et du chemin de propagation, le signal peut parvenir au récepteur sans atténuation significative par rapport aux pertes en espace libre.

Les deux figures permettent de constater que la courbure des trajectoires lors du passage à proximité de la couche d'inversion est moins prononcée que dans le cas des conduits surfaciques et qu'il n'existe pas de rebonds successifs des ondes. Comme décrit dans la section 2.2, la propagation engendrée par les conduits élevés est bien de type réflexion/réfraction sur la couche.

Figure 16 : Facteur de propagation dans le cas d'une propagation par conduit élevé (couche située entre 1000 et 1200 m)

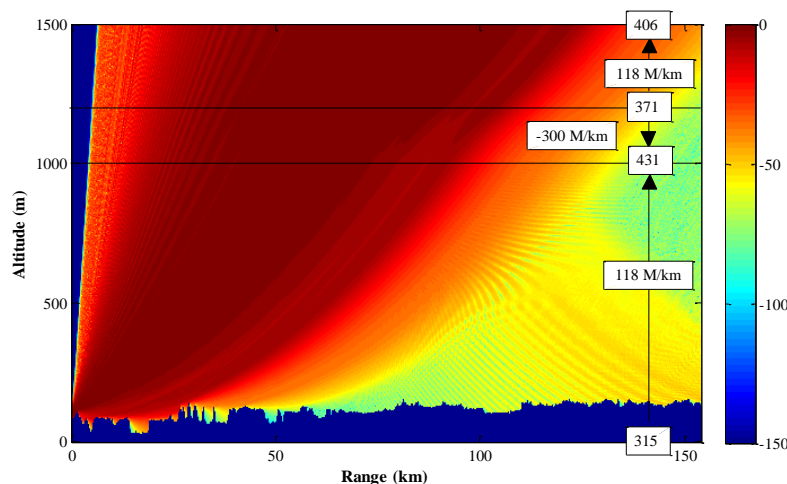
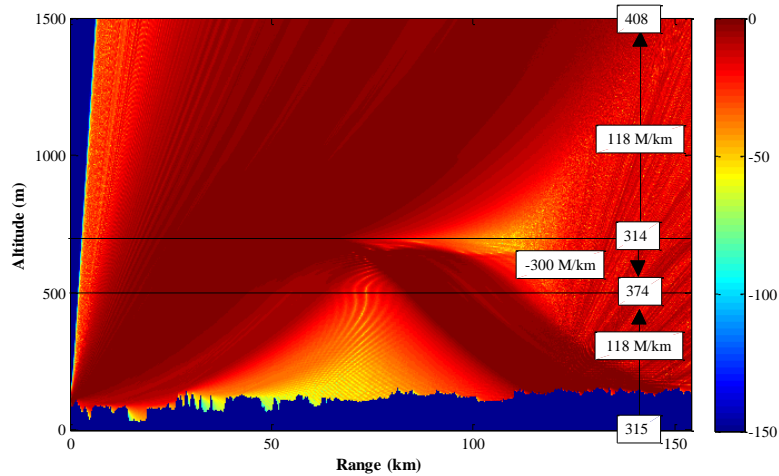


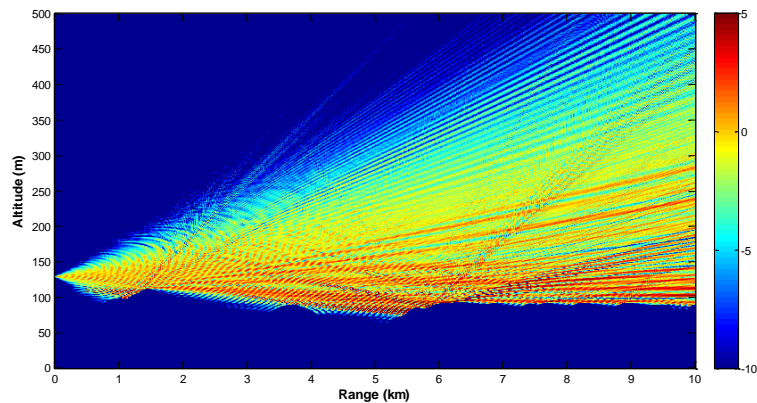
Figure 17 : Facteur de propagation dans le cas d'une propagation par conduit élevé (couche située entre 500 et 700m)



2.4.3.5 Conduit surfacique : Cas avec profil de terrain – Propagation par multi trajets.

A titre d'exemple pour l'amélioration de la propagation par multi trajets, la Fig.18 permet de rendre compte du comportement des ondes se propageant dans un conduit de surface sur une distance inférieure à l'horizon radioélectrique. La figure montre clairement que dans certaines zones, la valeur des pertes peut être inférieure à ce qu'elle est dans le cas d'une propagation par espace libre du fait des multitrajets (zone rouge positive).

Figure 18 : Facteur de propagation dans le cas d'une propagation par multi trajet (effet des conduits sur les distances courtes)



2.5 L'apparition des phénomènes de propagation anormale

Dans le rapport du COST 210 [14], les effets météorologiques à l'origine de la propagation anormale sont clairement identifiés. La stratification (avec évolution de l'indice de réfraction) des basses couches de la troposphère est clairement liée aux processus atmosphériques et principalement au mouvement d'air. Les conditions essentielles pour l'apparition de la propagation anormale s'axent principalement sur le recouvrement de l'air humide et froid par l'air sec et chaud durant les périodes de stabilité générale de l'atmosphère qui peuvent être représentées par des **conditions anticycloniques**.

Dans le nord-ouest de l'Europe, la situation décrite précédemment peut se produire par l'intermédiaire de trois causes :

1. *La subsidence* (déplacement vertical d'air de l'atmosphère vers le sol) anticyclonique. Cela se produit généralement au centre de l'anticyclone.
2. *L'advection* (déplacement horizontal d'air chaud et humide au-dessus d'une surface froide)
3. *Les radiations nocturnes* (transfert radiatif nocturne du sol vers l'atmosphère, dans le domaine des IR, de l'énergie solaire accumulé par la surface de la Terre dans la journée. Ce phénomène se produit à plus grande échelle lorsque le ciel est peu nuageux.

D'un point de vue météorologique général, les phénomènes 2 et 3 sont principalement dus aux conditions anticycloniques. Ce qui signifie que c'est bien cette condition qui est le point de départ des propagations anormales. D'autre part, les phénomènes 1 et 2 se produisent indépendamment sur la terre ou sur la mer, alors que 3 est uniquement présent sur terre.

Selon le rapport COST 210, qui dresse un état très détaillé de l'ensemble de ces phénomènes sur le nord-ouest de l'Europe, la propagation anormale est souvent associée, sur des chemins maritimes à des phénomènes de subsidence et d'advection, alors que sur les chemins terrestres, la subsidence et les radiations nocturnes sont les principaux contributeurs.

Par association avec le Tab. 4 ci-dessous, il est donc possible de conclure qu'en Europe, la présence sur terre de conduits de surface ou de surface élevés ne peut être qu'uniquement liée aux phénomènes radiatifs nocturnes ou à des fronts météorologiques. Les conduits élevés, dans ces zones, peuvent apparaître après la disparition des conduits de surface ou de surface élevés lors du réchauffement par le lever du soleil [15].

D'un point de vue général, les événements de superréfraction ou de « ducting » sont moins nombreux au-dessus des terres qu'au-dessus des océans tropicaux, mais connaissent toutefois des fluctuations particulièrement importantes en fonction des saisons [9].

Sur mer, les conduits d'évaporation s'étendent typiquement de la surface jusqu'à 15 m, alors que les conduits de surface lié à l'advection s'étendent jusqu'à au moins 25m. [12] décrit statistiquement la probabilité d'apparition des conduits d'évaporation en fonction de leur hauteur sur différentes mers. Au-dessus de la Mer Égée, cette loi est gaussienne avec une hauteur de l'ordre de 10 à 12 m pour un maximum d'occurrence de l'ordre de 12 à 13% du temps. Pour la mer du Nord, le maximum d'occurrence apparaît aux alentours de 20% pour des hauteurs de l'ordre de 5 à 6 m.

L'Atlantique Nord & le Pacifique Nord sont assez rarement affectés par la superréfraction ou le « ducting » [9] et notamment en hiver. Ceci étant le résultat de l'activité orageuse intense et quasi incessante dans ces régions qui a pour tendance de mélanger verticalement la troposphère, ne permettant pas, dès lors, la création de couches superposées d'indices de réfraction différents. Les régions tropicales présentent au contraire une superréfraction quasi permanente par l'effet cumulé de l'inversion de température associé aux Alizés et une forte évaporation à la surface de la mer.

[16] décrit particulièrement bien les conditions d'apparition météorologique des conduits de propagation surfacique maritime. En général la température de la mer est quelques degrés au-dessus de la température de l'air. Cependant, il existe des périodes où cet écart s'inverse, et c'est durant ces périodes que l'apparition des conduits surfaciques est le plus observé [3]. Les études menées montrent entre autre que :

- La température de l'air doit être plus importante que celle de la mer (ou de l'océan)
- Que la température maritime doit être supérieure à 12°C
- Que la température de l'air doit être supérieure à 16°C (si l'eau supérieure à 12°C)
- Cette différence de température positive d'Air-Mer doit être associée à une atmosphère stable thermiquement et à des conditions de haute pression (anticyclonique).
- L'humidité de l'air juste au-dessus de la mer doit être d'au moins 9g/m³.
- La vitesse du vent doit être inférieure à 6m/s (condition de mer clame, voire très calme)
- Une croissance importante de l'indice de réfraction dans les couches basses de la troposphère (>340 N-unité).

Les études entreprises dans [9] montrent une évolution statistique des événements de « ducting » en fonction des horaires (00h00, 06h00, 12h00 et 18h00) pour les différentes saisons de l'année. Ces études sont basées sur des données de mesure élaborées durant 5 ans. Dans la zone européenne, les résultats montrent clairement que la fréquence d'apparition des conduits de propagation est minimum en hiver et maximum en été avec des valeurs intermédiaires en automne et au printemps.

Cela s'explique par le fait que le développement de couche basse nette à gradient de co-indice négatif est fortement gêné durant le printemps et l'automne par le brassage intense de la troposphère due en partie au réchauffement de l'atmosphère, par les rayons du soleil et aux activités d'advection qui en découlent. Durant l'hiver ceci s'explique davantage par la faiblesse de la pression partielle de la vapeur d'eau et par l'activité orageuse.

Il est intéressant de constater par ailleurs que quelle que soit la saison, le « ducting » est quasiment inexistant sur l'heure de midi. Sur la terre, les conduits de propagation bas (conduit de surface et de surface élevé) ont plus tendance à apparaître durant les phases nocturnes (du crépuscule à l'aube) et ceci s'explique assez simplement

par le refroidissement des surfaces au sol et réchauffement des couches d'air superposées par radiation. Autour de la méditerranée, le cycle saisonnier est particulièrement prononcé avec des événements de « ducting » présent quasiment 100% du temps en été et moins de 15% en hiver.

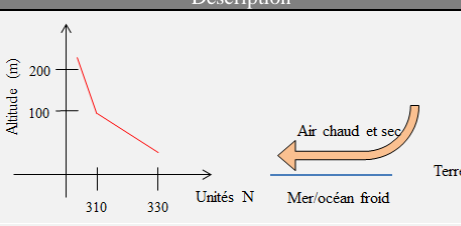
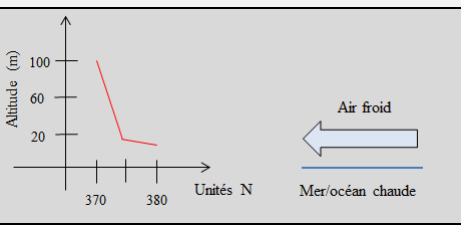
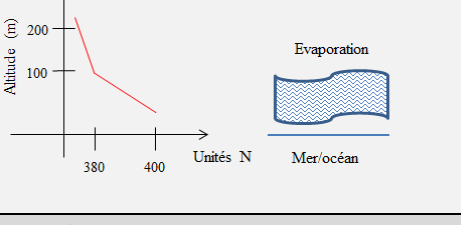
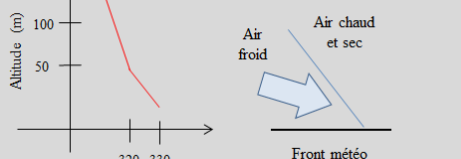
Dans une étude menée en à Podebrady en République Tchèque [10], l'évolution des conduits élevés est mesurée sur des périodes courtes (une heure) toutes les 5 minutes dans les 200 premiers mètres de la troposphère. Ces mesures sont effectuées, non pas par des radiosondes, mais à l'aide de 90 capteurs météorologiques disposés le long d'une tour de plus de 150 mètres de haut. Les résultats sont particulièrement intéressants et révèlent que :

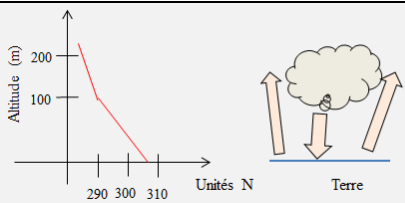
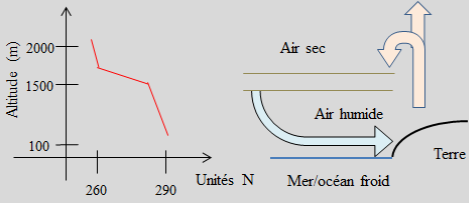
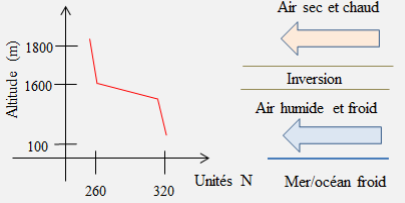
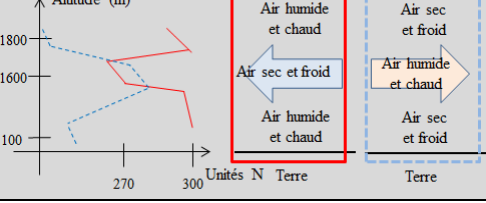
1. Certaines couches de la troposphère sont complètement ignorées par les radiosondes du fait de leur durée de vie très faible
2. Certaines couches dans la basse troposphère ont des structures très fines qui requièrent une résolution inférieure à 10 m
3. Enfin, et c'est sûrement le plus important, les couches caractérisant les conduits élevés présents dans la troposphère peuvent changer de caractéristiques de façon significative sur des échelles de temps allant de la minute à la dizaine de minutes.

À titre informatif, l'analyse des données de [10], montrent que la distinction entre les conduits de surface élevé et les conduits élevés, n'a pas réellement de sens, car l'évolution de l'indice de réfraction (ou du co-indice de réfraction avec l'altitude) en fonction du temps peut amener à ce qu'un conduit élevé devienne du fait de la définition des conduits, un conduit de surface élevé.

Pour suivre au quotidien l'évolution des conduits de propagation partout dans le monde, il est possible de se connecter à la page internet suivante : http://www.dxinfocentre.com/tropo_eur.html. Les conduits sont référencés en termes de force et décrits par des surfaces superposées aux cartes géographiques. Le site permet de connaître l'évolution des conduits par tranches de 6 heures et fait des prévisions sur plusieurs jours.

Tableau 4: Tableau de synthèse des phénomènes météorologiques à l'origine des différents types de conduit. Les cases bleues correspondent aux phénomènes présents sur mer. Les cases ocre à ceux présents sur terre. Parfois les processus sont présents dans les deux milieux.

		Conduit de surface	
Processus mis en cause	Description	Description	occurrence
<u>Advection</u>	Déplacement d'air chaud et sec au-dessus d'une surface humide et froide		1 – Au-dessus de large étendue d'eau (lac, baie, golfe et mer) particulièrement le long des côtes adjacentes aux régions désertiques (notamment Golfe Persique et Manche durant l'été) 2 – Au-dessus de vallées froides irriguées, sous des pentes montagneuses chaudes et sèches.
<u>Quasi-advection</u> Mouvement horizontal d'un air froid au-dessus d'une surface chaude et humide (mer ou terre humide) Plus le vent est fort, plus le gradient est important			1 - Dans les mers tempérées en hiver (parfois Atlantique Nord par exemple) 2 – Au-dessus des terrains humides près des tropiques (par exemple la Floride) durant l'hiver 3 – Dans les zones tempérées après un passage de front froid
<u>Evaporation</u> Evaporation d'une surface humide (mer ou terre humide) dans l'air à la même température. Plus le vent est fort et plus l'air est chaud plus le gradient est faible			1 – Au-dessus des régions terrestres tropicales (couverture végétale) 2 – Au-dessus des mers lorsque l'air est aussi chaud que la mer et en l'absence de vent fort 3 – Au-dessus des mers dans les régions où les alizées règnent – ce phénomène peut être quasi permanent (8 à 20 m)
<u>Processus de front météo</u>	Avancé d'un air froid le long d'une surface d'une masse d'air chaude stable		Sur la terre, à proximité d'un front météo (jonction de deux masses d'air différentes)

<u>Radiation</u> Radiation d'un sol chaud vers un ciel froid			Par temps clair, sans vent, la nuit (inversion de température et accroissement de la température avec l'altitude)
Conduit élevé			
<u>Advection</u>	Déplacement d'air chaud et sec au-dessus d'une surface humide et froide		Au-dessus des terres et des mers près des côtes. Durant le jour le réchauffement des surfaces terrestres dû au soleil cause une augmentation de la température de l'air sec près des terres et un mouvement de l'air humide de la mer vers les terres (brises marines)
<u>Subsidence</u>	Le flux d'air des cellules de haute pression (comme le flux d'air chaud et sec) passe au-dessus d'un air froid et humide		Au-dessus de l'eau entre les latitudes 5° et 25° Nord et Sud, les conduits apparaissent par inversion des alizées. Ceci étant dû à la subsidence de l'air sec des hautes altitudes qui s'affaisse sur l'air froid et humide présent au-dessus de la mer au-dessus des terres, c'est le mouvement d'un large système de haute pression
<u>Intrusion advective</u>	Le déplacement horizontal d'air traverse une masse autre masse d'air de caractéristiques différentes (cela peut créer de multiples couches élevées)		Une partie de l'air chaud et humide traverse une masse d'air froid et sec. Ce phénomène est très souvent observé sur terre dans les régions tempérées, tout comme le phénomène inverse

III - Modélisation du « ducting »

Il existe globalement deux grands types de modélisation des conduits de propagation :

- Des modèles totalement déterministes qui se basent uniquement sur des lois et/ou des théories physiques. On notera dans cette catégorie : l'optique géométrique, la théorie des guides d'onde ou la résolution de l'équation des ondes.
- Les modèles empiriques qui s'axent principalement sur l'observation des phénomènes. Dans cette catégorie, les modèles associés aux Recommandations UIT sont particulièrement représentés

3.1 Modélisation par la théorie des modes ou « full wave »

D'un point de vue théorique, il est tout à fait possible de considérer les conduits de propagation comme des guides d'onde qui répondent à la « théorie des modes ». Selon cette théorie particulièrement bien connue en électromagnétisme, un guide s'apparente à une structure dans lequel s'établit en fonction de la fréquence différents états propres (ou modes) définis par des valeurs propres (vitesse de phase et atténuation) et des fonctions propres (distribution de l'énergie – configuration des champs électromagnétiques).

À ces états propres sont donc naturellement associées des configurations de champs électromagnétiques qui s'établissent dans le guide. Cette théorie se base sur la résolution exacte des équations de Maxwell, toutefois dans le cadre des conduits de propagation, elle représente une solution difficile à mettre en œuvre et nécessitant des approximations importantes [17].

Le principal problème auquel est confrontée la théorie des modes lorsqu'elle doit être appliquée aux conduits de propagation, c'est la nature de la paroi supérieure du guide qui n'est pas métallique (mais lié à une évolution de l'indice de réfraction). Cet effet a pour conséquence que l'ensemble des modes troposphériques perd de l'énergie lorsqu'il se propage (bien que le taux d'atténuation pour les premiers modes soit très faible).

Il est aussi intéressant de noter que la théorie des modes devient particulièrement difficile à mettre en œuvre dans le cas conjoint des hautes fréquences et des épaisseurs de conduits importantes, car le nombre de modes se propageant devient considérable. Ce type de modélisation se retrouve aussi confronté au même type de problème lorsque la source se retrouve en dehors du guide [18]. Enfin, cette théorie ne permet pas réellement par des méthodes simples de tenir compte des profils de terrain.

3.2 Modélisation par l'équation des ondes

Dans le cadre de la modélisation des effets de « ducting » de façon déterministe, la modélisation la plus communément employée est liée à la résolution de l'équation d'Helmholtz (équation aux dérivées partielles elliptique qui apparaît lorsque l'on cherche des solutions stationnaires de l'équation de propagation des ondes) :

$$\nabla^2 \varphi + k^2 n^2 \varphi = 0$$

Ou plus simplement en deux dimensions, lorsque l'on considère la distance et l'altitude :

$$\frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \varphi}{\delta z^2} + k^2 n^2 \varphi = 0$$

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

Par nature, l'équation différentielle du second ordre ci-dessus est dite parabolique puisque son discriminant est nul. Dans le cadre de la résolution d'une telle équation, les conditions aux limites sont absolument nécessaires et l'équation est donc bornée par le sol (de conductivité plus ou moins finie) et par une limite au-dessus à une altitude choisie.

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

$$\frac{\delta^2 u}{\delta z^2} + 2jk \frac{\delta^2 u}{\delta x} + k^2 \left(n^2 - 1 + \frac{2z}{a_e} \right) u = 0$$

Où $u(x, y) = e^{-jkx} \varphi(x, z)$ est une fonction réduite qui suppose une variation lente en fonction de la distance (x) , a_e est le rayon de la terre et k , le nombre d'onde.

L'approximation parabolique de cette équation aux dérivées partielles d'ordre 2 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, dans le cadre de [19], les ondes réfléchies peuvent être modélisée 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 peut être résolu par l'emploi de méthodes numériques (FDTD [20], FEM [21]...). Dans le cadre de [19] ce type d'équation est résolu par la méthode numérique de Fourier dite « à pas divisé » (« split-step » dérivée de la FFT). D'un point de vue global, la méthode permet de prendre en compte le digramme de rayonnement de l'antenne d'émission et de calculer pas à pas le champ dans les deux directions de l'espace (distance, altitude). À titre d'exemple, le champ à la distance $x+\Delta x$ peut être approximé par l'équation [19] [22] :

$$u(x + \Delta x) = \exp \left[jkm \frac{\Delta x}{2} \right] F^{-1} \left\{ \exp \left[-jp^2 \frac{\Delta x}{2k} \right] F \{ u(x, y) \} \right\}$$

Où F désigne la transformée de Fourier, p est la variable de transformation définie par $p = k \sin \theta$, θ définissant l'angle de propagation par rapport à l'horizon et m , l'indice de réfraction modifié donné par $m = n^2 - 1 + 2z/a_e$.

C'est sur cette base théorique que le logiciel PETOOL © [23], parfois utilisé dans ce rapport pour décrire le comportement des ondes dans les conduits de propagation, a été élaboré. Il permet entre autre de donner avec une grande précision les niveaux de champs reçus par un récepteur à différentes hauteurs, en tenant compte de sa distance avec l'émetteur, mais aussi des effets de terrain (diffraction et/ou réflexion) et de la modification de l'indice de réfraction de l'atmosphère en fonction de l'altitude (§2.4.3).

Les modèles purement déterministes restent toutefois difficilement utilisables 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 ces modèles, basés sur des lois fondamentales de la physique ondulatoire restent en totale adéquation avec les phénomènes observables ou mesurables, ils ne peuvent en aucun cas se substituer à des modèles plus empiriques et/ou statistiques qui auront par nature tendance à prendre en considération les évolutions du système avec le temps.

3.3 Modélisation semi-déterministe et/ou empirique.

Dans le cadre de cette partie, certains modèles empiriques sont décrits ici comme semi-déterministes, car même s'ils sont basés sur des observations, ils conservent toutefois des équations associées à des lois physiques (perte en espace libre par exemple). Dans le cadre de ce type de modèle, on peut retrouver par exemple les modèles HATA (et l'ensemble de ces dérivés), Longley-Rice, mais aussi de nombreuses Recommandations UIT. Un certain nombre d'entre elles prennent en compte les effets de conduits de propagation dans le calcul des pertes associées à un trajet de propagation particulier, on notera :

- La **Recommandation UIT-R P.452-14** : Méthode de prévision pour évaluer les brouillages entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 0,1 GHz environ.
- La **Recommandation UIT-R P.1546-4** : Méthode de prévision de la propagation point à zone pour les services de Terre entre 30 MHz et 3 000 MHz.
- La **Recommandation UIT-R P.1812-2** : Méthode de prévision de la propagation fondée sur le trajet pour les services de Terre point à zone dans les bandes des ondes métriques et décimétriques.
- La **Recommandation UIT-R P.2001-1** : Modèle général de large portée pour la propagation sur des trajets de Terre dans la gamme des fréquences comprises entre 30 MHz et 50 GHz.

Deux de ces recommandations sont utilisées plus particulièrement pour de calcul point à point alors que les deux autres sont plus axées sur des calculs de point à zone (utile particulièrement dans le cas de la radiodiffusion). Trois de ces recommandations (**P.452**, **P.1812** et **P.2001**) font appel à la résolution d'équations basées en partie sur des résultats empiriques associés à une modélisation semi-déterministe alors que la quatrième est purement empirique et s'appuie sur des courbes de mesure élaborées dans certaines conditions dont les résultats doivent être ajustés par la suite par extrapolation ou interpolation. Le Tab.5 suivant résume quelques éléments de chaque recommandation.

Tableau 5 : Caractéristique des recommandations

Grandeurs		UIT-R P.452-14	UIT-R P.2001-1	UIT-R P.1546-4	UIT-R P.1812-2
Validité	fréquence	0.7 – 50 GHz	0.030 à 50 GHz	30 – 3000 MHz*	30 – 3000 MHz
	Distance	0 à 10000 km	3 à 1000 km	1 à 1000km**	0.25 à 3000 km
	Pourcentage de temps	0.001% à 50%	0.001% à 99.999%	1, 10 et 50%***	1 à 50%
	Pourcentage d'emplacement	Sans objet	Sans objet	50% (sur une zone de 500x500m)****	1 à 99%
Généralité		Point à Point	Point à Point	Point à Zone	Point à Zone
Type de modèle		Semi-déterministe et empirique	Semi-déterministe et empirique	empirique	Semi-déterministe et empirique
Eléments pris en compte	Visibilité Directe (LoS) (P.528)	oui (Δ)	oui	Indirect (Δ)	oui
	Diffraction (P.526)	oui	oui	Indirect+ Annexe 4.3	oui
	Diffusion Troposphérique	oui	oui	Indirect	oui
	Condition de propagation anormale (« ducting », multi trajets)	oui	oui	Indirecte + Annexe 9	oui
	Réciprocité / Symétrie (émetteur/récepteur)	oui	oui	non	non
	Pluie (P.836-4, P.837-4, P.838 & P.839-9)	Possible	oui	non	non
	Absorption Gaz (P.526)	non directe	oui	non	non
	Propagation couche sporadique type E	Non (Δ)	oui	non	non
<p>*Courbe élaborée à 100, 300 et 2000 MHz. Interpolation et extrapolation des champs en fonction de la fréquence (voir §6 Annexe 5) ** Interpolation du champ en fonction de la distance possible (voir §5 Annexe 5 de la recommandation) ***Pourcentage de temps intermédiaire possible par Interpolation du champ en fonction du pourcentage de temps (voir §7 Annexe 5) ****Correction possible pour d'autres valeurs de pourcentage (voir §12 Annexe 5) (Δ) Les termes « oui », « non » et « Indirect » sont définis comme tel :</p> <ul style="list-style-type: none"> • « oui », la perte est prise en compte par équation dans la recommandation • « non », la perte n'est pas prise en compte par équation dans la recommandation • Indirect, signifie qu'indirectement la perte est prise en compte, bien que parfois des ajustements soient nécessaires par l'intermédiaire d'Annexes 					

À noter que la prise en compte des effets de propagation par conduits (ou « ducting ») est identique dans les Recommandations **UIT-R P.452-14**, **UIT-R P.2001-1** et **UIT-R P.1812-2**. De fait, ces éléments sont régis dans les trois recommandations par les mêmes équations qui seront analysées par la suite. Le tableau (Tab.6) suivant permet de rappeler les conditions de propagation prépondérantes suivant le pourcentage de temps et la longueur

du trajet. Il permet entre autre de comprendre la nécessité de disposer de modèles de « ducting » pertinents, car ce phénomène est particulièrement prédominant pour les distances longues et les pourcentages de temps faibles.

Tableau 6 : Conditions de propagation

Pourcentage de temps	Longueur du chemin			
	Important (50%)	Ligne de vue	Transhorizon court	Transhorizon long
	Faible (0.01%)	Espace libre	Diffraction	Troposphérique
		Espace libre + multi trajet*	« Ducting »	« Ducting »
*Multi trajet lié à la présence de la stratification de l'atmosphère				

3.3.1 Modélisation semi-déterministe et empirique

Les équations qui régissent les effets de conduits de propagation ont été élaborées sur l'approximation de données empiriques. Ces équations peuvent se retrouver dans les **Recommandations UIT-R P.452-15**, **UIT-R P.2001-1** et **UIT-R P.1812-2**. Pour ces recommandations des données numériques relatives à des statistiques de l'évolution de l'indice de réfraction dans les couches basses de l'atmosphère sont aussi nécessaires (§2.3). La suite de cette partie va s'axer sur l'étude de chaque composante qui régit le résultat final de la perte associée à des propagations par conduits. Dans les **Recommandations UIT-R P.452-15** et **UIT-R P.1812-2**, la procédure de prévision utilise trois paramètres radio météorologiques pour décrire la variabilité des conditions de propagation normales et anormales aux différents endroits du globe.

- ΔN (unités N/km) : gradient moyen de l'indice de réfraction radioélectrique dans le premier kilomètre de l'atmosphère (valeur pour 50% du temps), qui permet de déterminer le rayon équivalent de la Terre à utiliser pour l'analyse du profil de trajet et de la diffraction par les obstacles. La valeur de ΔN est accessible dans les documents attachés à la **Recommandation UIT-R P.452**. En Europe, sa valeur est en moyenne de -39 à -40 unités N/km. Cependant, celui-ci peut varier de 30 à 80 unités N/km (pour une année moyenne) et de 50 à 100 unités N/km (pour le pire mois).
- Le paramètre β_0 (%), pourcentage du temps pendant lequel on peut s'attendre, dans les 100 premiers mètres de la basse atmosphère, à une décroissance du gradient de l'indice de réfraction supérieur à 100 unités N/km (condition au minimum de superréfraction), est utilisé pour estimer l'incidence relative de la propagation totalement anormale à la latitude considérée. La valeur à utiliser pour β_0 est la valeur qui correspond à la latitude du point milieu du trajet. Dans les **Recommandations UIT-R P.452** et **UIT-R P.1812**, cet élément est estimé par l'intermédiaire de formules qui seront décrites par la suite. De fait à l'origine de ces recommandations ce paramètre devait être relevé sur des cartes. L'introduction d'une équation dépendante en longitude a considérablement simplifié la procédure. Dans le cadre de la **Recommandation UIT-R P.453**, des cartes sont disponibles pour différents mois de l'année. À noter aussi que β_0 (%) varie autour du monde de 1 à 50% (pour une moyenne annuelle) et de 2 à 90 % (pour le pire mois).
- N_0 (unités N), co-indice de réfraction au niveau de la mer, est utilisé exclusivement dans le modèle de la diffusion troposphérique comme mesure de la variation de ce mécanisme de diffusion en fonction de l'emplacement. Les valeurs de N_0 sont accessibles dans le fichier N050.TXT de la **Rec. UIT-R P.452-15**. Le calcul relatif au trajet de diffusion est fondé sur une géométrie de trajet déterminée par les valeurs annuelles de ΔN ou par les valeurs de ce paramètre correspondant au mois le plus défavorable.

Dans la **Recommandation UIT-R P.2001**, la méthodologie est un peu différente pour caractériser les événements radio météorologiques et s'appuient sur :

- ΔN (unités N/km) : gradient moyen annuel de l'indice de réfraction radioélectrique dans le premier kilomètre de l'atmosphère comme pour les autres recommandations. Ce qui signifie qu'il est valable 50% du temps
- S_{dN} qui représente globalement l'évolution de ce gradient moyen en fonction du pourcentage de temps considéré sur la zone géographique où la propagation a lieu.

Ces deux paramètres sont ensuite associés pour donner une approximation de la valeur de ΔN au pourcentage de temps $p\%$ recherché.

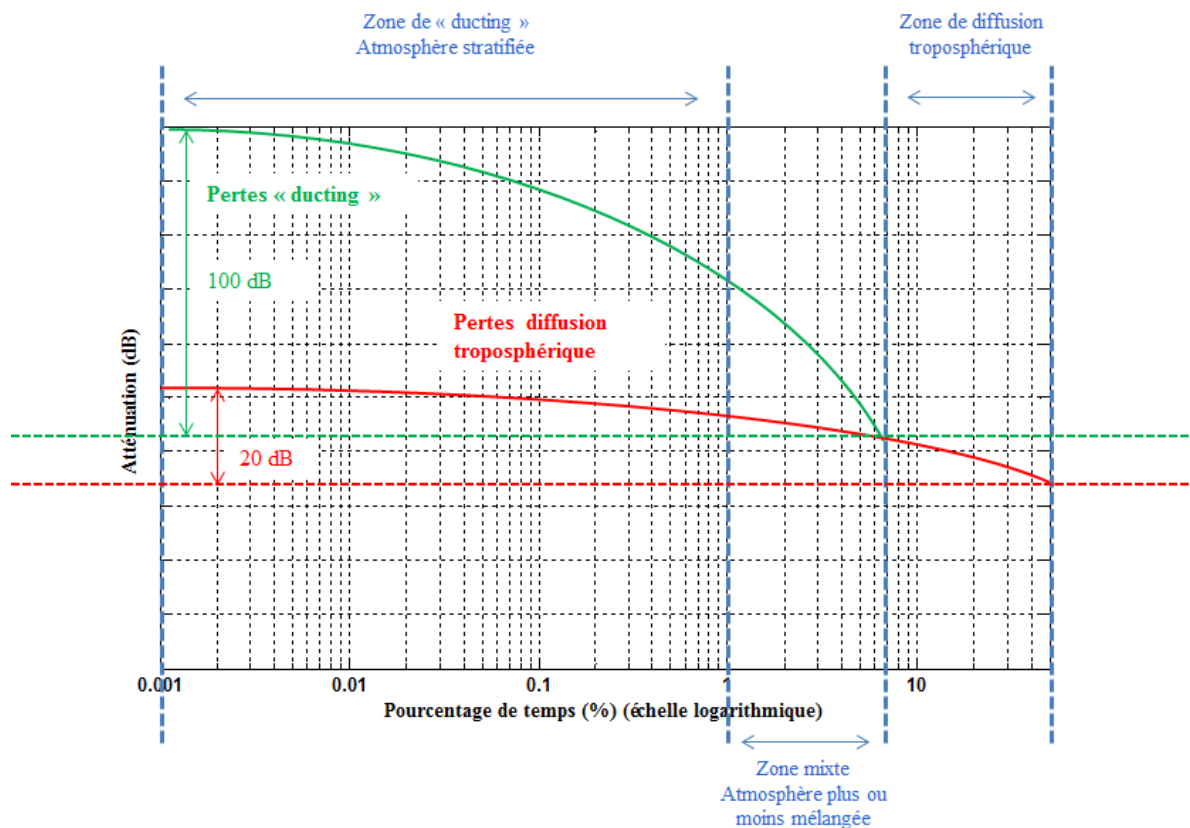
D'un point de vue des équations (identiques pour les trois recommandations), elles se basent sur un mélange de termes physiques et empiriques. Le détail est relativement compliqué, car il existe un grand nombre de termes de correction pour tenir compte du nombre important de mécanismes de propagation. Néanmoins, la base des calculs s'axe sur la détermination des valeurs de deux paramètres :

- Un pourcentage de temps $\beta(\%)$, dérivé en quelque sorte de $\beta_0(\%)$. À ce stade, il est nécessaire de comprendre que $\beta_0(\%)$ et donc $\beta(\%)$ sont totalement intrinsèque à l'environnement géographique et climatique de la zone de calcul, alors que $p(\%)$ est le pourcentage de temps durant lequel les pertes calculées ne doivent pas être dépassées. Ce paramètre est choisi par l'utilisateur, contrairement aux deux précédents.
- Une perte basique de transmission L_{ba} qui apparaît à ce pourcentage de temps $\beta(\%)$, qui doit bien sûr être ajustée par la suite en fonction de la valeur de $p\%$ choisi par l'utilisateur. L_{ba} est simplement la perte liée au conduit qui peut être modélisée avec une confiance certaine, car les conditions de propagation par conduit au pourcentage de temps $\beta(\%)$ sont pleinement établies.

D'un point de vue général, ces deux paramètres ($\beta(\%)$, L_{ba}) définissent une fonction cumulative de distribution (évolution décroissante des pertes avec la décroissance du pourcentage de temps). Ce qu'il est important de comprendre, c'est que $\beta_0(\%)$ (et donc $\beta(\%)$ aussi) est décorrélé de la valeur de pourcentage de temps $p\%$ intégrée comme entrée dans le modèle. Ce sont des données météorologiques et de localisation du centre du chemin qui déterminent la valeur de $\beta_0(\%)$. Par la suite, c'est la connaissance de ces deux paramètres qui permet de retrouver les pertes pour un pourcentage de temps considéré $p\%$ en projetant ces deux valeurs sur la CDF empirique.

La **Recommandation UIT-R P.452-15** est principalement basée sur les études menées par la Commission Européenne dans le cadre du COST 210 : « *Influence of atmosphere on interference between radio communications systems at frequency above 1GHz* ». Comme expliqué dans la partie 3.3.1.5, historiquement la partie relative à la modélisation du « ducting » provient en partie des travaux entrepris par le British Telecom Research Laboratories (BTRL) sur la base d'une fonction de distribution cumulative de distribution dite de référence trouvée par l'intermédiaire d'un très grand nombre de mesures. La Fig.19 tente de synthétiser ce qu'il est nécessaire de comprendre dans la méthodologie de modélisation de la propagation transhorizon.

Figure 19 : Evolution théorique des pertes liées à l'ensemble des comportements atmosphériques associés à la propagation en fonction du pourcentage de temps (CDF). Les limites bleues sont mobiles et dépendent de nombreux facteurs.



Il d'abord possible d'observer que trois zones sont présentes dans cette CDF. Pour les pourcentages de temps très faibles, l'atmosphère est clairement stratifiée et la propagation se fait par conduit et/ou par réflexion/réfraction par les couches élevées de la troposphère. Pour les pourcentages de temps très importants, c'est bien la diffusion troposphérique qui est prédominante. Entre ces deux phénomènes, il existe une zone l'on considère que l'atmosphère est plus ou moins mélangée et des phénomènes très complexes de propagation

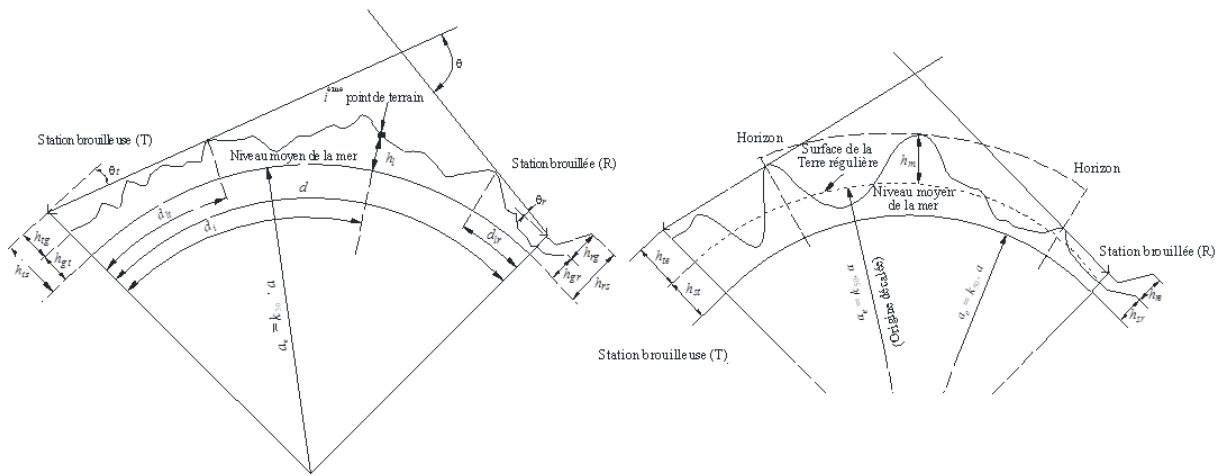
s'établissent. Seule la méthodologie de modélisation basée sur les CDF peut en rendre compte (impossible à modéliser de façon purement déterministe).

3.3.1.1 Les éléments techniques du modèle de propagation anormale dans les Recommandations

Afin de parfaitement comprendre les équations qui régissent la modélisation des phénomènes de propagation anormale, il convient de s'intéresser tout d'abord aux paramètres géométriques qui régissent la procédure d'estimation décrite dans les trois recommandations semi-déterministes. Une des données les plus importantes dans la procédure est liée à la distance angulaire θ (mrad) qui s'exprime en fonction de l'angle d'élévation maximal de l'horizon des antennes de transmission θ_t et de réception θ_r , du rayon fictif de la terre a_e et de la distance d comme :

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r$$

Figure 20 : Figure récapitulative de l'ensemble des grandeurs utilisées dans la P.452. À gauche, représentation du terrain réel, à droite, représentation du terrain équivalent lissé nommé aussi « Terre régulière ».



3.3.1.2 Les éléments qui affectent le pourcentage de temps $\beta(\%)$

D'après la **Recommandation UIT-R P.452-15** (Version 15), le terme $\beta(\%)$ est basé sur la valeur du paramètre $\beta_0(\%)$. Ce dernier est une valeur générique associée à des mesures effectuées dans le nord-ouest de l'Europe et il doit donc être modifié par l'intermédiaire de la contribution de 4 facteurs qui déterminent l'incidence du pourcentage de temps sur la propagation anormale sur un chemin de propagation particulier. Les expressions de $\beta(\%)$ et de $\beta_0(\%)$ se résument par :

$$\beta = \beta_0 \mu_2 \mu_3 (\%) \quad \text{avec} \quad \beta_0 = fct(\mu_1 \mu_4) = \begin{cases} 10^{-0.015|lat|+1.67} \mu_1 \mu_4 (\%) & \text{pour } |lat| \leq 70^\circ \\ 4.17 \mu_1 \mu_4 (\%) & \text{pour } |lat| \geq 70^\circ \end{cases}$$

Le terme de $\beta_0(\%)$ tenant compte des latitudes en exposant est extrait d'une approche d'approximation des données de mesures par réseaux de neurones [11]. Une application numérique montre que le terme $10^{-0.015|lat|+1.67}$ donne une valeur de $\beta_0(\%)$ (sans tenir compte de la rectification par les grandeurs μ_1 et μ_4) de l'ordre de 8 à 10% pour des latitudes de 49°N à 43°N (France).

Ces valeurs étant pleinement en corrélation avec celles trouvées à partir de l'étude des valeurs de mesure fournies par la **Recommandation UIT-R P.453** (voir §2.3). Comme il l'a déjà été stipulé, la présence de conduit n'implique pas spécifiquement de couplage avec ce dernier, c'est pourquoi $10^{-0.015|lat|+1.67}$ est modifié par différents facteurs. Les paramètres qui modifient $10^{-0.015|lat|+1.67}$ sont :

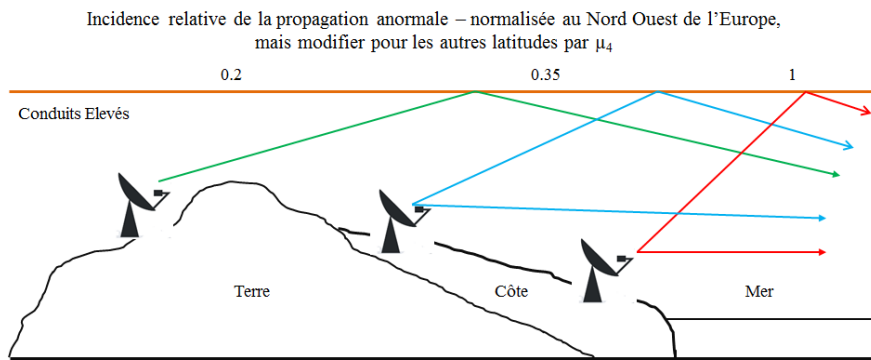
- Le paramètre μ_1 : lié au ratio qu'il existe sur le chemin de propagation entre les zones de Terre, de mer et/ou de côte traversées.
- Le paramètre μ_2 : associé à la géométrie du chemin
- Le paramètre μ_3 : associé à la rugosité du chemin.
- Le paramètre μ_4 : la correction de la dépendance en latitude de l'apparition relative de la propagation anormale sur les chemins de Terre, de mer et/ou de côte. De fait μ_4 ajuste la valeur de μ_1

Détails sur les paramètres μ_1 et μ_4

L'approche choisie pour tenir compte de la proportion de Terre/mer/côte le long du chemin de propagation résulte des études radio météorologiques entreprises durant le COST210 [14]. Les études avaient confirmé que bien que les conditions de propagation anormales affectent les trois zones (zone de Terre, région côtière plane ou zone maritime) de façon similaire. Les conditions particulières de « ducting » touchent principalement les chemins maritimes. Cependant, les études ont aussi mis en évidence que le « ducting » pouvait apparaître dans les zones côtières à faible altitude (mais amoindri par rapport à ce qu'il est au-dessus des mers).

Elles ont enfin montré que si l'incidence relative de la propagation anormale au-dessus des mers (résultant de l'apparition des phénomènes de « ducting ») était prise comme référence unitaire, alors sur les chemins terrestres était de l'ordre de 0.15 à 0.2 et sur les chemins côtiers de l'ordre de 0.35 – voir Fig.21.

Figure 21 : Incidence relative de la propagation anormale au-dessus de la Terre, de la mer et de la côte (valeur donnée pour le Nord-Ouest de l'Europe)

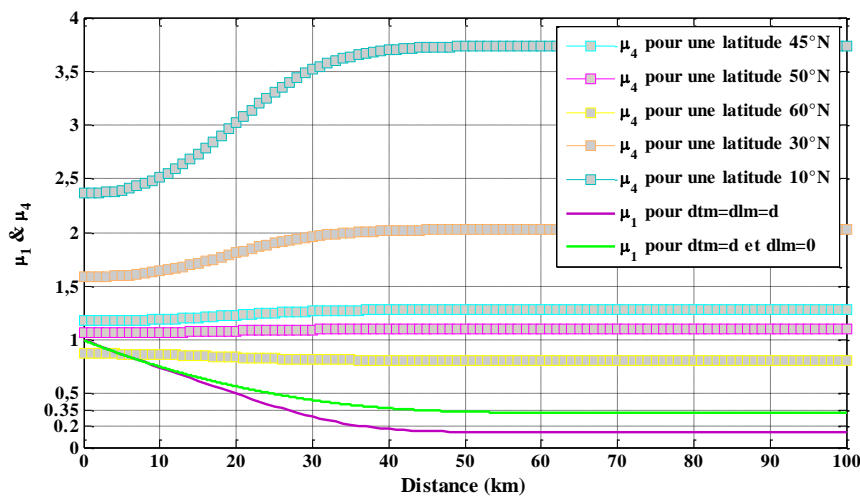


La découverte la plus importante de ces études fut que des sections de terre relativement courtes (autour de 40 km) auraient tendance à isoler l'antenne des conduits de propagation présents au-dessus des mers. Ce type de chemin afficherait alors seulement les caractéristiques d'un chemin de terre (c'est-à-dire des caractéristiques de propagation dans les couches de réfraction/réflexion) quelle que soit la longueur de la section maritime restante.

L'incidence relative de la propagation anormale au-dessus de la Terre, de la mer ou de la côte est associée au nord-ouest de l'Europe. Pour les autres latitudes, le ratio doit être corrigé par le facteur μ_4 .

La Fig.22 montre très clairement que μ_4 est proche de 1 pour les latitudes autour de 50°N et peut prendre des valeurs proches de 4 pour des latitudes se rapprochant de l'équateur.

Figure 22 : Evolution des paramètres μ_1 et μ_4 (en fonction de la distance). Hypothèse faite d'un chemin sur terre, c'est-à-dire que $d_{lm}=d_{tm}=d$. Evolution de μ_4 pour différente latitude



Dans la Fig.22, les courbes verte et mauve montrent l'évolution de μ_1 lorsque l'on passe respectivement d'un chemin maritime à un chemin terrestre ou d'un chemin maritime à un chemin côtier. Dans les deux cas, plus le ratio entre la distance terrestre par rapport à celle maritime devient important, plus le paramètre μ_1 décroît.

Elle permet aussi d'observer clairement que si :

1. $dtm=dlm=0$, le chemin est purement maritime et μ_1 est donc égal à 1
2. $dtm=dlm=d$, le chemin est purement terrestre, il n'y pas de côte. Dans ce cas, la valeur de μ_1 tend vers 0.2 à partir de 40 km d'éloignement de la mer. Il faut comprendre que plus d augmente, plus le ratio entre la mer et la terre s'amenuise et donc plus μ_1 diminue.
3. Lorsque $dtm=d$ et $dlm=0$; il n'y a pas de chemin purement terrestre et le chemin est purement côtier. Dans ce cas, la valeur de μ_1 tend vers 0.35

Dans cette même figure, sont présentés les résultats de l'évolution de μ_4 en fonction de la distance (puisqu'on fonction de μ_1) et des latitudes. Plus la latitude s'approche de l'équateur, plus le coefficient multiplicatif est important. Ce qui bien entendu est en plein accord avec les données de la **Recommandation UIT-R P.453-6**

Détails sur le paramètre μ_2

La valeur de $\beta(\%)$ est aussi modifiée par la géométrie du chemin de propagation. Plus la longueur du chemin est importante et la hauteur de l'antenne est faible, plus grande est la distance angulaire. La Fig.23 représente clairement le concept de la distance angulaire et de sa modification particulière dans le cas des phénomènes de propagation anormale. On notera sur cette figure que θ' peut avoir une valeur différente de θ (utilisé dans le cadre du calcul des pertes par diffusion troposphérique) lorsque l'un ou l'autre des horizons sous-entend un angle positif sur l'antenne associée. Pour simplifier, le calcul de l'angle θ' permet de prendre en considération la diffraction par un obstacle sur le chemin de propagation.

Figure 23 : Distance angulaire modifiée θ' (mrad) utilisée pour le calcul des conditions de propagation anormale

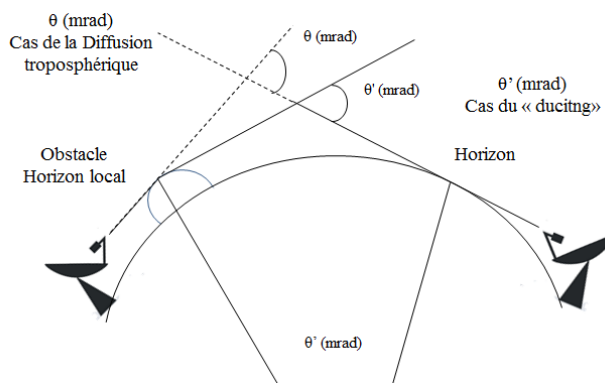
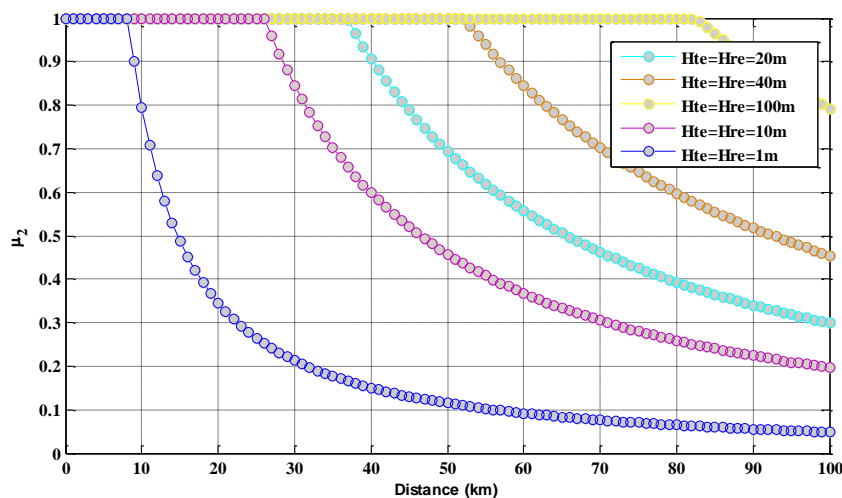


Figure 24 : Evolution des paramètres μ_2 (en fonction des hauteurs Hte et Hre – hauteurs équivalentes dans le cas d'un profil de terrain lissé). Ces hauteurs ne sont pas les hauteurs véritables des émetteurs et récepteurs.



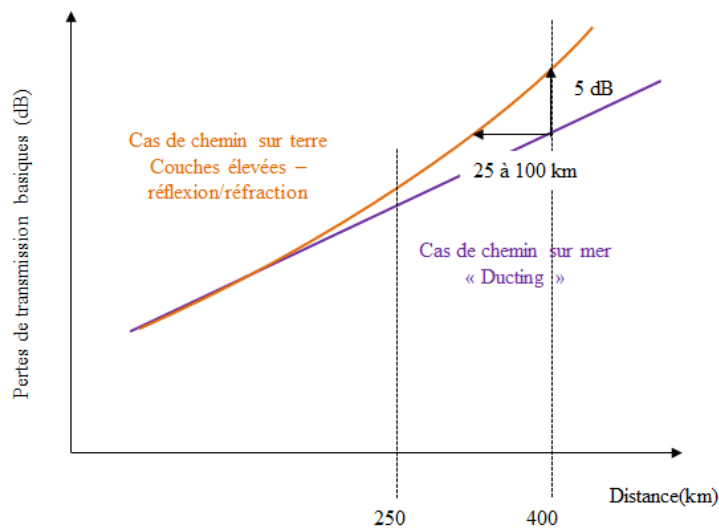
Si la distance angulaire augmente, les conditions de propagation par conduit sont de plus en plus difficiles à réaliser dans l'atmosphère stratifiée (voir §2.4 – Couplage dans le conduit). De plus si les exigences sur la structure de

l'indice de réfraction sont grandes (variation importante dans la structure verticale), la probabilité que ces conditions se produisent sera particulièrement faible. On peut donc en déduire que la valeur de $\beta(\%)$ diminue avec l'accroissement de la distance angulaire du chemin.

De fait H_{te} et H_{re} sont étroitement liés au paramètre θ' , puisque ces grandeurs définissent les hauteurs équivalentes respectivement des émetteurs et récepteurs au-dessus de l'épaisseur d'un profil de terrain équivalent lissé. Pour simplifier, si le terrain est peu accidenté, alors H_{te} et H_{re} sont approximativement égales à H_{tg} et H_{rg} , hauteur réelle des antennes sur le sursol. Si ces hauteurs augmentent, alors la distance angulaire diminue.

Les points d'inflexion (à partir de la valeur de $\mu_2=1$) pour l'ensemble des courbes de la Fig. 24 correspondent simplement à distance sommée des horizons radioélectriques des émetteurs et récepteurs (calculés en considérant la courbure relative de la Terre ae). Autrement dit μ_2 est le facteur qui permet de rendre compte de la capacité de l'émetteur et du récepteur à se coupler avec le conduit de propagation. Plus le conduit va être éloigné de l'horizon radio électrique, plus il va être difficile de s'y coupler. D'un point de vue métropolitain, la Fig.30 permet de prendre la mesure de l'évolution de ce paramètre sur le territoire français.

Figure 25 : Différence dans la dépendance en distance entre les cas maritime et terrestre pour des distances au-delà de 250 km



Il est important de noter qu'une différence significative existe entre la dépendance de la distance du « ducting » et les mécanismes de réflexion/réfraction. Les conduits de propagation (spécialement au-dessus de la mer) s'étendent sur des distances considérables (1000 km et plus). En première approximation, les pertes dans le conduit peuvent être considérées comme une atténuation spécifique linéaire résultant de la perte provenant du conduit et de la réflexion par la surface de la Terre (particulièrement au-dessus de la surface terrestre).

Une fois que l'énergie est piégée dans la structure du conduit, elle va suivre la courbure de la terre jusqu'à ce que la limite du conduit soit atteinte. Les données de mesure ont montré que les conduits de propagation surfaciques et les couches de propagation élevées de longueur courte à moyenne (jusqu'à 250 km) présentaient des pertes très similaires bien que leur caractéristique d'apparition était très différente.

Tout d'abord, au-delà de 250 km, différents facteurs apparaissent : dans le cas des couches élevées, l'énergie n'est pas contrainte de suivre la courbure de la Terre. Lorsque la distance augmente autour de la courbure de la Terre, l'angle d'incidence du signal arrivant dans les couches élevées de l'atmosphère présentant une superréfractivité augmente aussi. Plus cet angle augmente et plus l'énergie du signal aura tendance à traverser les couches plutôt que de se réfléchir sur ces dernières.

Ensuite, lors des études radio météorologiques faites pour le COST210, une analyse des données des radiosondes a montré que la probabilité de trouver une couche présentant une certaine force diminuait avec la hauteur. Ceci signifie donc que la probabilité de trouver une couche à fort gradient (permettant une atténuation minimale du signal) est aussi réduite.

La combinaison des deux effets présentés ci-dessus mène à une réduction relativement rapide de la probabilité d'existence de chemin présentant des pertes minimales lorsque la distance augmente. La Fig.25 synthétise ces éléments en montrant, par ailleurs, clairement que des niveaux d'interférence importants liés à la propagation dans les couches élevées deviennent très rares au-delà de 400 km.

Détails sur le paramètre μ_3

Le dernier facteur qui influence $\beta(\%)$ est la rugosité du terrain, caractérisé par l'élément μ_3 . D'un point de vue synthétique, on peut dire :

1. Que sur un terrain plat, les couches élevées de réflexion/réfraction, les conduits surfaciques et les conduits peu élevés ont une grande probabilité de créer des chemins de propagation présentant des pertes très faibles
2. Sur un terrain à rugosité modérée, les aspérités de ce dernier peuvent bloquer les propagations se faisant par le biais des conduits surfaciques. Les couches les plus élevées peuvent encore propager un signal avec des pertes minimales. La probabilité que ce type de signal existe est toutefois réduite par rapport au cas 1 précédent.
3. Enfin sur un terrain très rugueux, alors seules les couches élevées peuvent propager un signal avec des pertes très faibles, ce qui réduit encore davantage la probabilité de l'apparition de ce type de signal.

Certains terrains élevés suppriment toutefois ce dernier mécanisme et dans ce cas, les pertes par diffusions troposphériques deviennent prépondérantes dans le calcul des pertes.

Figure 26 : L'impact de l'augmentation de la hauteur de terrain

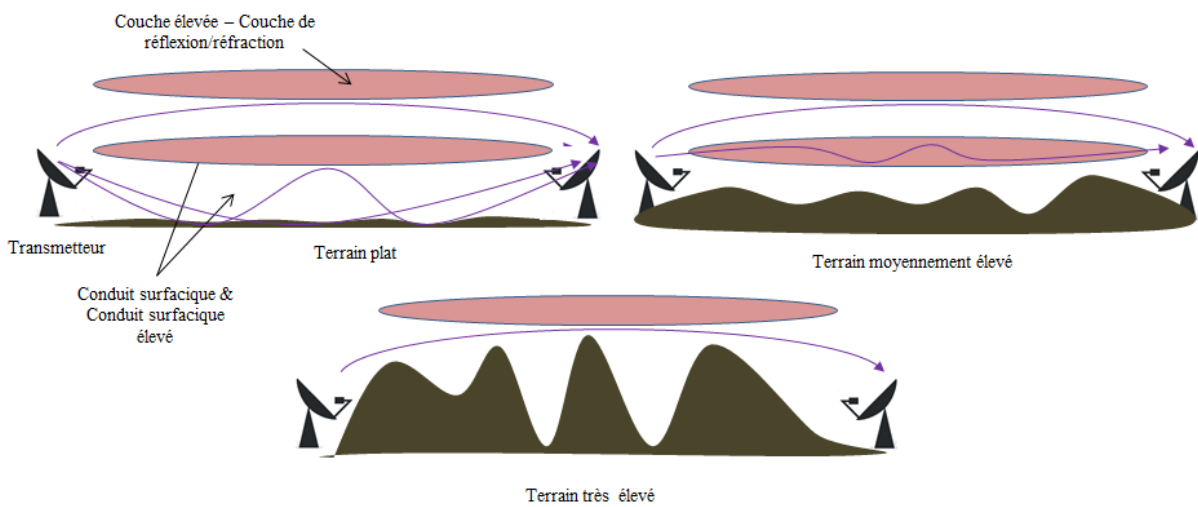
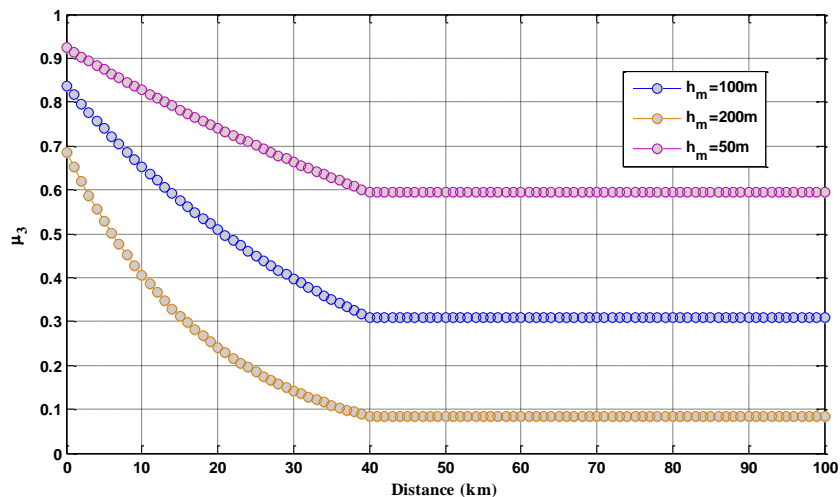


Figure 27 : Evolution des paramètres μ_3 (en fonction de h_m)



L'équation permettant de calculer μ_3 est directement liée à la hauteur de dégagement minimum h_m (voir Fig.25 – hauteur maximum du relief au-dessus de la Terre régulière). L'expression exprime directement que si $h_m < 10m$ alors $\mu_3 = 1$, ce qui signifie que le terrain est peu rugueux, alors il n'y a pas de modification de $\beta(\%)$ par le terrain. Pour des hauteurs supérieures, l'expression tient compte de la distance qu'il existe entre le premier élément diffractant pour l'émetteur et le premier élément diffractant pour le récepteur ($d-d_t-d_r$) et cette distance est limitée à 40km, cela signifie donc que l'expression considère qu'au-delà de 40 km entre ces deux éléments, le

couplage n'est plus modifié par la distance (Fig.27). La Fig.31 permet d'observer l'évolution de ce paramètre sur le territoire français.

3.3.1.3 Les éléments qui affectent les pertes de transmission L_{ba}

D'un point de vue général, les pertes L_{ba} sont calculées par l'intermédiaire d'un large panel de concept qui suit globalement les hypothèses suivantes :

1. Il y a une propagation normale entre les antennes et leur horizon respectif (espace libre)
2. Le couplage à l'intérieur et à l'extérieur de la structure régissant la propagation anormale apparaît au deux horizons radioélectriques
3. En moyenne, il y a une perte de couplage de 6 dB entre le conduit ou les couches élevées et le signal sur chaque horizon.
4. Les pertes dans le conduit de propagation ou sur les structures de réflexion/réfraction peuvent être modélisées par une simple atténuation spécifique (décroissance fonction de la distance).
5. Les angles positifs sur l'horizon (créé par des obstacles du terrain) peuvent créer des pertes par diffraction même dans les conditions de propagation anormale
6. Les antennes à des altitudes faibles et proches de surfaces maritimes (parfois directement dans le conduit de propagation) ne présentent pas les 6dB de couplage avec le conduit

Les pertes par les mécanismes de propagation par conduit se résument donc par l'équation suivante :

$$L_{ba}(p) = A_f + A_g + A_d + A(p)$$

1. A_f correspond aux pertes de couplage fixe, c'est-à-dire aux pertes en espace libre entre l'équipement et son horizon respectif, les pertes de diffraction par écran du site et le terme de correction par couplage avec les conduits surfaciques au-dessus des mers, A_f s'exprime donc comme :

$$A_f = 102.45 + 20 \log(f) + 20 \log(d_{lt} + d_{lr}) + A_{lf} + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr}$$

- Les pertes par espace libre sont fréquemment dépendantes. Elles s'appliquent, comme décrit dans les hypothèses, entre l'émetteur et son premier obstacle et entre le récepteur et son premier obstacle. Cet obstacle peut être l'intersection du trajet par la sphéricité de la Terre. À l'origine, l'équation était celle de l'espace libre auquel étaient ajoutés les 2x6dB de couplage, soit une constante égale à 104.4dB. Toutefois, la valeur de 102.5 a permis un meilleur ajustement avec les données mesurées. Ces pertes s'écrivent donc dans la recommandation comme :

$$102.45 + 20 \log(f) + 20 \log(d_{lt} + d_{lr})$$

- L'écran par le site (A_{st} , A_{sr}) est modélisé par une combinaison de diffraction par des pointes et par diffraction avec la sphéricité de la Terre. Ce dernier est uniquement appliqué pour les angles d'arrivée sur l'horizon positif. Le modèle est dépendant de la fréquence et doit donner une bonne approximation des effets même à basse fréquence. Dans l'expression ci-dessous le terme θ'' fait référence à l'ajustement de θ par rapport à $d_{L,r}$ et s'exprime donc comme $\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0.1 d_{L,r}$.

$$A_{st}, A_{sr} = \begin{cases} 20 \log[1 + 0.361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{L,r})^{1/2}] + 0.264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & (\text{dB}) \text{ pour } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 & (\text{dB}) \text{ pour } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases}$$

La **Recommandation UIT-R P.452** emploie un modèle simple de diffraction pour permettre d'avoir une marge de sécurité dans le cas des horizons à grande distance. En effet les horizons lointain, souvent lié à des terrains vallonnés lisses (petite colline...etc) peuvent être associés à des distances angulaires positives, mais avec des angles d'arrivée très faibles. Autrement dit, la correction du site A_{st}, A_{sr} , s'applique uniquement pour des distances angulaires positives, mais plus grande que $0.1 d_{L,r}$ (d'où l'emploi de θ'' dans l'expression ci-dessus – En effet si θ'' est positif, c'est que θ est plus grand que $0.1 d_{L,r}$ – et la correction par A_{st}, A_{sr} s'applique). Ceci a donc pour conséquence d'augmenter la marge de protection lorsque la distance augmente. La comparaison avec $0.1 d_{L,r}$ provient de l'expérience, si la distance angulaire est supérieure, l'effet de l'horizon devient équivalent à celui d'un écran du site.

- La correction du couplage (A_{ct}, A_{cr}) avec les conduits surfaciques au-dessus des mers est indépendante de la fréquence. Ce terme prend en compte le fait que les antennes basses proches de la côte peuvent se coupler directement dans un conduit de surface, alors que le modèle basique de « ducting » suppose que le celui-ci apparaît seulement entre les horizons du transmetteur et du

récepteur. La correction applique -6dB de réduction de pertes pour une antenne proche du niveau de la mer ou sur une ligne de côte et diminue jusqu'à 0dB pour des antennes qui sont plus hautes que 100m ou à plus de 5km des côtes.

$$A_{ct}, A_{cr} = \begin{cases} -3e^{-0.25 d_{ct,cr}^2} \left[1 + tgh \left(0.07(50 - h_{ts,rs}) \right) \right] & (dB) \text{ pour } \omega \geq 0.75, d_{ct,cr} \leq d_{lt,lr} \text{ \& } \leq 5km \\ 0 & (dB) \text{ sinon} \end{cases}$$

- La correction empirique A_f qui sert à tenir compte de la croissance de l'atténuation en fonction de la longueur d'onde dans le conduit de propagation. Cet élément a été rajouté dans les dernières versions de la recommandation (voir §3.3.1.5)

Le couplage à l'horizon est compris dans la constante de 102.5 dB. On a pu voir que ce couplage était possible (ou le plus efficient) lorsque l'angle entre le signal et l'atmosphère stratifié était positif, mais négligeable (proche de 1°). Pour des angles négatifs, le trajet du signal est tangentiel à la surface de la Terre. Une partie de l'énergie de l'antenne ne se couplera pas aux conduits, d'où les 6 dB de pertes associées. Lorsque le terrain crée un angle positif, les hypothèses, comme vues précédemment, expriment que l'énergie des signaux arrivant avec des angles importants passeront au travers de l'atmosphère stratifiée. Donc dans ces circonstances, seuls, les signaux diffractés par l'obstacle arrivant avec des angles faibles dans l'atmosphère seront couplés au conduit ou réfléchis/réfractés par les couches élevées. Les pertes de cette diffraction par l'obstacle sont modélisées par A_{st} et A_{sr} . D'un point de vue purement scientifique, le couplage ne se produit pas sur un point unique (point le plus haut de l'élément diffractant), mais sur un ensemble de points plus ou moins distants autour du point d'horizon.

2. A_g correspond à l'atténuation par les gaz. Sa contribution est toutefois particulièrement minime dans les pertes globales.
3. A_d tient compte des pertes (liées à la propagation et aux fuites d'énergie) dans le conduit inter-horizon. C'est un terme relativement obscur dans la recommandation. Il provient du texte original de la P.452 (CCIR Report 569), mais les effets de ce dernier ne peuvent être estimés que lorsqu'un certain nombre d'autres termes (en particulier les pertes par couplage) lui sont combinés. On notera que le terme est donné par :

$$A_d = \gamma_{d(dB/mrad)} \theta'_{(mrad)} = 5 \cdot 10^{-5} \theta'_{(mrad)} a e_{km} f_{(GHz)}^{1/3}$$

Où θ' est la distance angulaire et ae le rayon équivalent de la Terre. En fait, A_d est uniquement la longueur du chemin ajusté pour tenir compte de l'angle non nul entre les horizons du transmetteur et du récepteur. Ce terme n'a pas réellement de justification physique, et a été approximé empiriquement. Il y a toutefois deux dépendances fréquentielles conflictuelles. Si la fréquence augmente, le conduit devient plus large comparé à la longueur d'onde et cela doit avoir pour effet de donner un moindre affaiblissement de l'onde EM (des pertes par diffraction plus petites). En revanche dans l'expression, l'augmentation de la fréquence a pour effet d'augmenter les pertes.

4. Enfin, la P.452 fait appel à un dernier terme associé à A_d nommé $A(p)$, faisant référence à la variabilité du pourcentage de temps et qui n'est ni plus ni moins qu'un ajustement à la fonction de distribution cumulative empirique. Cette distribution cumulative empirique a été obtenue sur la base de mesures. Les mesures étant effectuées sur un temps continu, la fonction de distribution cumulative originale ne pouvait différencier précisément dans l'évolution des pertes en fonction du temps ce qui était lié à la présence de conduit de ce qui était lié à la diffusion troposphérique (§3.3.1.5). Autrement dit, la fonction de distribution prend en compte aussi bien les pertes par ducting (pourcentage faible) qu'une partie des pertes par diffusion troposphérique et/ou diffraction (pourcentage fort). Cette fonction s'exprime comme :

$$A(p) = -12 + (1.2 + 3.7d \times 10^{-3}) \log \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma$$

$$\Gamma = \frac{1.076}{(2.0058 - \log \beta)^{1.012}} \times e^{-(9.5164.8 \log \beta + 0.198 (\log \beta)^2) \times 10^{-6} d^{1.13}}$$

Pour bien comprendre comme fonctionne $A(p)$, il faut partir du principe que $\beta(\%)$ et $p(\%)$ sont généralement différents. Au niveau de nos latitudes (France), le terme $\beta_0(\%)$ va varier globalement de 1 à 2% (avant multiplication par μ_1 et μ_4 , le terme dépendant de la latitude est plutôt proche de 10%) et le terme $\beta(\%)$, selon la géométrie du trajet de 0.1 à 0.5%. Or il arrive que l'on recherche les pertes non

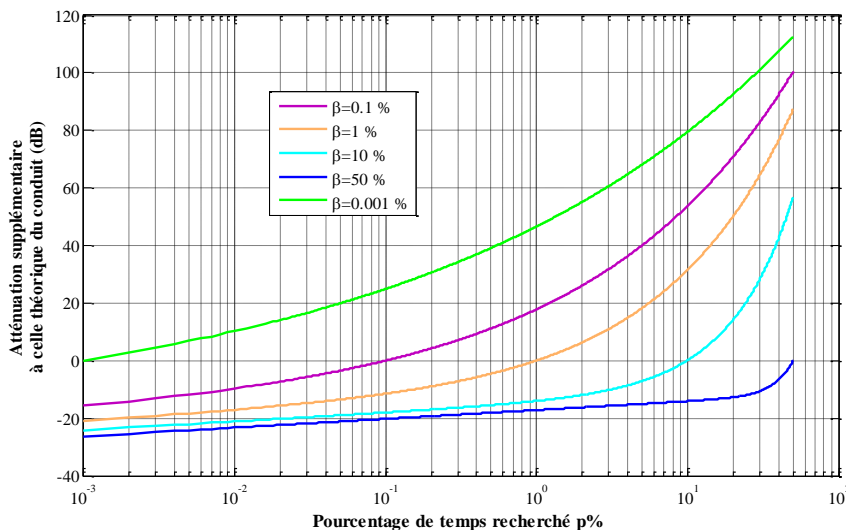
dépassées 2%, 5% ou encore 10% du temps. L'équation ci-dessus va donc apporter les corrections nécessaires à l'établissement des pertes pour ces pourcentages de temps. Pour simplifier grossièrement $A(p)$ pourrait être assimilé à une fonction de distribution cumulative d'un pseudo facteur de propagation, c'est-à-dire à la distribution des pertes additionnelles par rapport à celles inhérentes à l'espace libre et au conduit lui-même. Il est aussi possible de constater qu' $A(p)$ est totalement indépendant de la fréquence.

Une étude du comportement de la fonction avec la distance pour une valeur de $\beta(\%)$ donnée montre clairement que la longueur du trajet a peu, ou pas d'influence sur le comportement de $A(p)$. Ceci s'explique bien par le fait que lors d'une propagation par conduit, la distance n'influe en rien sur le facteur de propagation (puisque les pertes sont proches de celles de l'espace libre). De plus, la ou les références aux distances sont déjà intégrées dans les termes μ_i et donc dans l'évolution de $\beta(\%)$, mais aussi dans les pertes A_f (pertes en espace libre hors du conduit) et A_d (pertes dans le conduit). L'analyse de la Fig.28 (l'évolution de $A(p)$ par l'influence de $\beta(\%)$ pour une distance donnée) permet d'observer que si le pourcentage de temps recherché est exactement celui durant lequel la propagation par conduit se produit, il n'y a pas de perte additionnelle.

Dans une zone géographique du globe où la probabilité d'apparition de propagation par conduit est très faible ou inexistant ($\beta=0.001\%$), le fait de rechercher les pertes à 2% du temps, amène à introduire des pertes supérieures à 50 dB. Cela pourrait se traduire par le fait que les pertes associées à ce pourcentage de 2% de temps sont en moyenne, pour ce chemin, une combinaison de propagation par conduit et de diffusion troposphérique. Cette figure montre aussi bien les bornes de la fonction $A(p)$, l'évolution des pertes peut être au maximum de l'ordre de 110dB et au minimum de -25dB.

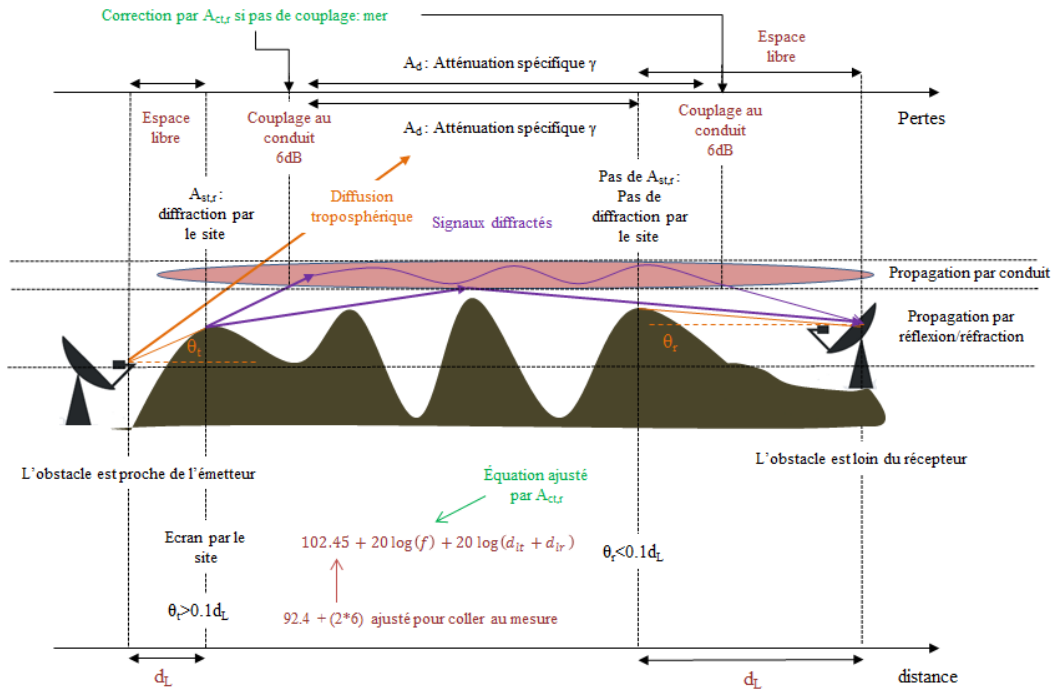
Finalement, et d'un point de vue synthétique $\beta(\%)$ représente le pourcentage de temps durant lequel les conditions de propagation anormale sont pleinement satisfaites et qui permettent d'obtenir les pertes minimum L_{ba} . Si le pourcentage de temps recherché est supérieur alors les conditions idéales ne sont plus respectées et l'atmosphère est dans un état transitoire qui génère des pertes supplémentaires. Si le pourcentage de temps est inférieur, alors le modèle considère que les conditions anormales persistent, mais reconnaît que des améliorations sont possibles par des déplacements d'air ou des effets de phase dans la structure stratifiée de l'atmosphère.

Figure 28 : Evolution de $A(p)$ en fonction du pourcentage de temps pour différentes valeurs de $\beta(\%)$. Une courbe plus détaillée peut être trouvée dans les annexes (Figure A.10)



La Fig.29, présentée ci-après, tente de synthétiser schématiquement, la méthodologie de modélisation proposée par la **Recommandation P.452-15**. Elle propose de reproduire l'ensemble des mécanismes pris en considération dans le modèle de « ducting ». Toutefois, elle représente en même temps différents cas de figure et ne peut donc être utilisée comme telle. Si les pertes associées à chaque mode de propagation (« ducting » et réflexion/réfraction sur les couches élevées) sont les mêmes, il est fortement improbable que ces deux mécanismes apparaissent ensemble.

Figure 29 : Figure synthétique représentant les différents procédés mis en œuvre dans le modèle de « ducting » de la **Recommandation UIT-R P.452**



3.3.1.4 Exemple et applications numériques.

Cette partie étudie l'évolution des paramètres μ_2 et μ_3 en prenant comme localisation du récepteur la station de radioastronomie de Nançay et en faisant évoluer la position du transmetteur dans différentes régions de l'hexagone. Les Fig.30 et 31 présentent respectivement les résultats pour chacune des grandeurs. Il convient de rappeler que le paramètre μ_2 tient compte de la géométrie du chemin (hauteur des émetteurs, récepteur, distance angulaire) alors que μ_3 prend en compte la rugosité du terrain. Ces figures ont donc l'avantage certain de clairement décrire l'évolution du pourcentage de temps durant lequel la propagation anormale est assurée ($\beta(\%)$).

Figure 30: Représentation de l'évolution du paramètre μ_2 sur le territoire français. Valeurs de μ_2 données en %

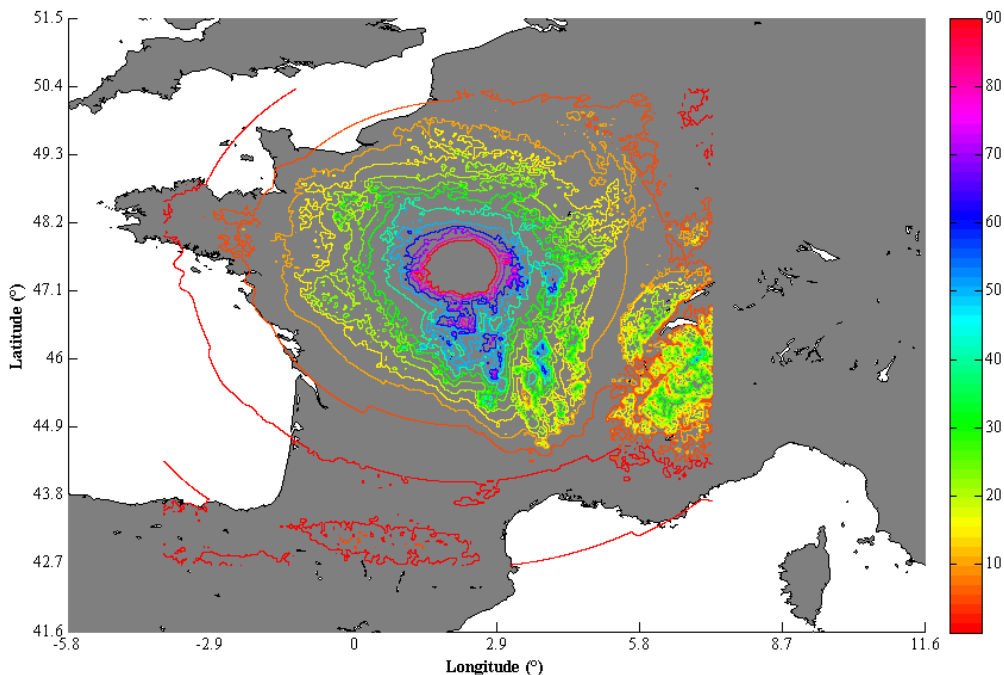
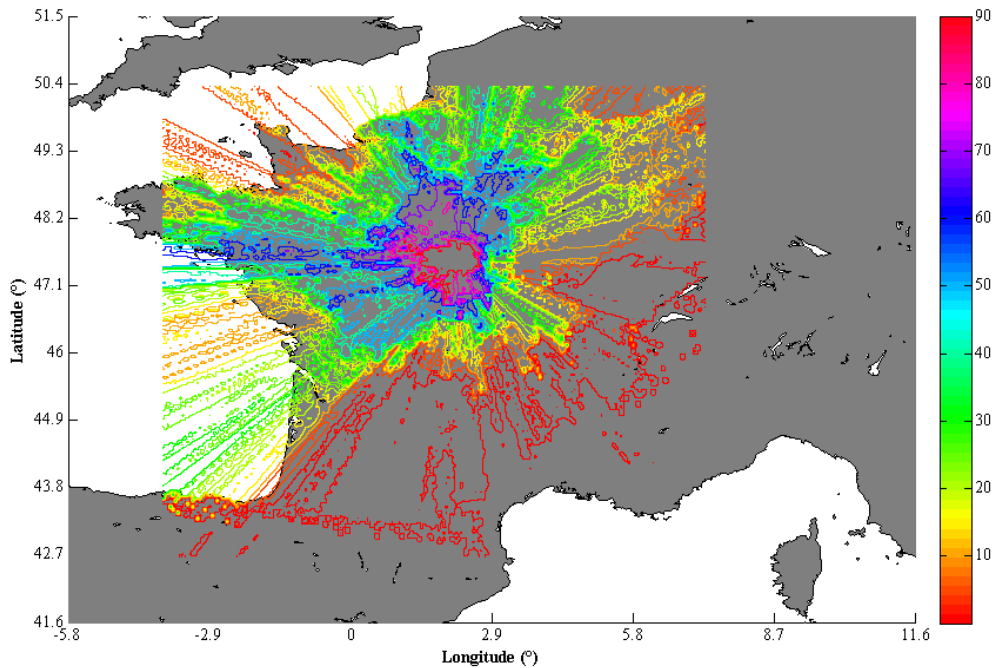


Figure 31: Représentation de l'évolution du paramètre μ_3 sur le territoire français. Valeurs de μ_3 données en %.



Pour un récepteur situé à proximité de la station de radioastronomie de Nançay, le paramètre μ_2 forme quasiment des cercles concentriques sur toute la partie Ouest, ceci s'explique aisément par un relief relativement estompé dans ces régions, aussi l'évolution de la longueur angulaire se fait sans présence d'obstacle important et uniquement par l'évolution de la distance entre émetteur et récepteur. Sur la partie Est et plus particulièrement Sud Est, la présence des Alpes implique la possibilité de trouver des transmetteurs pouvant être situés à des hauteurs importantes. Cette hypothèse a pour conséquence (en adéquation avec la Fig. 24) de diminuer la distance angulaire et donc d'augmenter le paramètre μ_2 . Tout comme dans le cas de la Fig.24, il est possible de constater que le paramètre μ_2 est maximal jusqu'à l'horizon radioélectrique conjoint de l'émetteur et du récepteur. Dans le cadre de cette étude, l'horizon de l'émetteur se situe autour de 28 km et proche de 18 km pour le récepteur. Autrement dit, le couplage de l'émission avec un canal et/ou une surface de réflexion/réfraction est maximal jusqu'à 46 km de distance entre les deux éléments, au-delà, celui-ci sera de plus en plus difficile à réaliser.

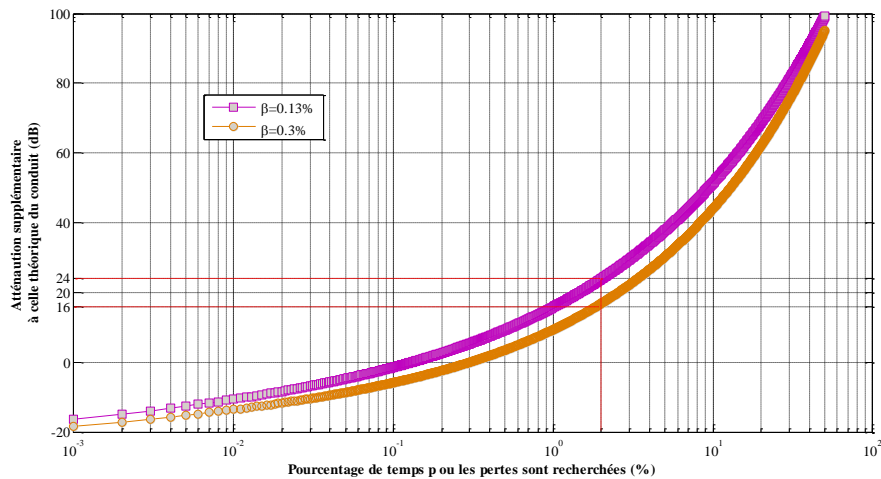
L'évolution du paramètre μ_3 pour un récepteur à proximité de la station de radioastronomie présente moins de ressemblance avec des formes géométriques simples, la Fig. 30 permet uniquement de constater que la présence de relief important sur le trajet (Alpes, Jura, Vosges, Massif Central et Pyrénéens) amoindrit considérablement ce paramètre. Sur l'ensemble du territoire compris entre l'Est et le Sud, le facteur μ_3 ne dépasse jamais 10% (ou 0.1).

Si des chemins entre la station de radioastronomie et l'Île de France devaient être tracés, les deux figures précédentes montrent que dans l'ensemble, le paramètre μ_2 serait de l'ordre de 20% et le paramètre μ_3 de 30 à 60% (avec 50% pour Paris même). On peut donc en conclure, que sur un trajet entre Nançay et Paris, le facteur multiplicatif sur le terme β_0 (%) est de l'ordre de 6 à 14% (respectivement 0.06 à 0.14). Sur terre, comme il l'a déjà été mentionné μ_1 est de l'ordre de 20% (0.2), pour nos latitudes la probabilité de présence de conduit est en moyenne $(10^{-0.015|lat|+1.67})$ de 9% et le paramètre de correction μ_4 équivaut à 1.2. Il est donc possible d'approximer que la valeur de β (%) (donc la présence de propagation anormale) est comprise entre 0.13% et 0.3% sur ce type de trajet. Rappelons tout de même que ces valeurs représentent le pourcentage de temps ou les pertes de propagation sur ces chemins sont celles de l'espace libre. Autrement dit, β (%) correspond à la probabilité de propagation anormale « idéale » (c'est-à-dire celle où l'ensemble des conditions atmosphérique - stratification exceptionnelle de l'atmosphère - génère, des pertes équivalent à l'espace libre).

La Fig.30 présente, pour ces types de chemin, les atténuations supplémentaires à considérer si les pertes sont recherchées pour 2% du temps, c'est-à-dire les pertes minimum dépassées 98% du temps. La fonction $A(p)$ définie par la **Recommandation** UIT-R P.452 exprime donc que ces pertes sont comprises entre 16 et 24 dB. Autrement dit, le modèle considère que sur ces chemins à 2% du temps, les conditions de propagation anormale sont encore respectées, mais les pertes qu'ils génèrent sont supérieures à celles de l'espace libre. Ceci peut s'expliquer physiquement par plusieurs facteurs très clairs, modification des dimensions des canaux (en

épaisseur et en longueur), évolution de leur indice de réfraction (fuite de puissance plus ou moins importante), etc...

Figure 31 : Evolution de A(p) sur les chemins considérés



Sur ces chemins assez généraux, un trajet de 154 km est choisi entre la station de radioastronomie et un village de la région parisienne, Boissy-Saint-Léger. La dernière colonne du Tab.7 donne les valeurs précises des différents paramètres permettant le calcul de β (%) pour ce chemin. L'atténuation à 2 % pour une valeur de β (%) de 0.19% est de 21 dB. Le Tab.8 donne les pertes globales sur le chemin.

Tableau 7 : Evaluation des éléments définissant le pourcentage de temps de la propagation par conduit pour le chemin de propagation choisi

Grandeurs	Min en France	Max en France	Valeurs
$10^{-0.015 lat +1.67}$ *	(50°N) 8.3	(43°N) 10.6	8.7
Terme fonction du type de milieu traversé (eau, terre...): μ_1	0.2	1	0.15
Terme fonction de la latitude : μ_4	1.3	1	1.21
β_0 (%)	2.15	10.6	1.42
Terme fonction de la géométrie: μ_2	0.01	1	0.2
Terme fonction de la rugosité: μ_3	0.001	1	0.56
β (%)	0.000002	10.6	0.19
* Pourcentage de temps d'apparition des conduits			

La première constatation que tout observateur peut faire sur le Tab.8, c'est la proximité des valeurs numériques entre les pertes en espace libre sur l'ensemble du chemin et l'addition des pertes décomposées à l'intérieur et à l'extérieur du conduit. De façon simple, ce résultat est logique, car les pertes par conduits doivent dans de nombreux cas être proches des pertes en espace libre. La modélisation des pertes de propagation à 2% du temps par le biais de la **Recommandation UIT-R P.452** donne donc une atténuation à 2% du temps de 167 dB pour ce chemin particulier.

Tableau 8 : valeurs des différentes composantes de pertes liées au « ducting » sur le chemin choisi

Grandeurs	Valeurs (dB)
Perte en espace libre sur la totalité du chemin (A_{fs})	144.5
Pertes extérieures aux conduits A_f	135
Perte interne aux conduits A_d	11
	$\gamma_d=0.59$ dB/mrad
	$\theta=17$ mrad
Perte de la fonction de distribution cumulative A(p)	21
Perte totale liée au « ducting »	167

3.3.1.5 Historique du modèle de propagation anormale

Le modèle précurseur: le modèle du COST Project 210

Le COST projet 210 [14] était un regroupement dynamique de personnes provenant de 19 organisations réparties dans 10 nations, travaillent comme un comité technique vers un but commun. Leurs travaux ont été finalisés en 1991 et publiés par la Commission Européenne. Leur objectif premier était de fournir des procédures de prédiction des niveaux d'interférence et d'établir des distances de coordination de manière à minimiser les distances de sécurité entre les stations radio en Europe.

Le rapport du COST 210 explique clairement que le projet a été initialisé à une époque où l'expansion de l'utilisation du spectre devenait de plus en plus rapide. Le besoin de partager le spectre devint alors urgent et la nécessité de pouvoir prédire ce partage le fut tout autant. Le problème de la coordination au-dessus d'une surface ou entre deux points le long d'un chemin s'est avéré prégnant en Europe du fait d'un grand nombre de conditions de propagation sur ce territoire et le nombre relativement important de petits pays.

Les travaux, précédents ceux du COST 210, notamment au CCIR étaient très utiles, mais souffraient globalement :

1. d'un manque crucial de données de mesure, et plus spécifiquement au-dessus de 1GHz
2. de difficulté à produire des procédures de prédiction comprehensive pour des problèmes aux aspects particulièrement complexes.

Le COST 210 s'est attaché principalement à considérer les interférences sur des chemins terre-terre entre des stations à la surface du sol en considérant l'ensemble des mécanismes atmosphériques par temps clair (diffraction, diffusion troposphérique, ducting...etc), la diffusion par les hydrométéores ainsi que les effets de terrain. Au final, le rôle du COST 210 fut d'étudier et d'analyser des modèles déjà existants, provenant du CCIR, du CNET, du BTRL (*British Telecom Research Laboratories*) ou encore du STR (*Swedish Telecom Radio*), et de développer une approche totalement nouvelle pour les procédures de prédiction en se basant sur des mesures élaborées dans différentes régions de l'Europe par un grand nombre de liaisons à différentes fréquences (voir Annexe 5.1 du rapport – toutes les données accessibles ainsi que les CDF mesurées sur chaque liaison)

Dans le cadre du sujet auquel ce rapport s'intéresse, le COST 210 est très clair :

- Sur le "ducting" et les surfaces de superréfraction: *"This is the most important short-term interference mechanism on long paths over water and in flat coastal land areas. The main difficulty to be overcome here is the treatment of obstacle and surface roughness losses within the ducting situation. The 'Ah' approach used by CCIR and the Longley-Rice model [Longley and Rice, 1968], etc. (where Ah is the interdecile range of terrain heights along the path), can lead to an under-estimation of interference in certain cases"*.
- Sur la réflexion/réfractions sur les couches élevées: *"The treatment of reflection and/or refraction from layers at heights up to a few hundred metres is of major importance as these modes enable signals to bypass the diffraction loss of the terrain very effectively under favourable path-geometry situations. Failure to recognise this propagation mode is one of the serious weaknesses of existing models. This mode may cause high signal levels where terrain roughness would otherwise give low signal levels by diffraction."*

Dans le cadre de l'étude des phénomènes atmosphériques, le climat du nord-ouest de l'Europe a été examiné avec soin par les études du COST210 avec comme objectif :

1. D'identifier les conditions météorologiques importantes causant les interférences
2. D'attacher à ces dernières des concepts de mécanismes de propagation simples qui pouvaient être modélisés
3. De déterminer la gamme des chemins radiométéorologiques qui pouvaient être inclus dans la procédure à concevoir
4. D'estimer l'importance de chacun des mécanismes de propagation sur chaque type de chemin.

Les conclusions des études entreprises sur le modèle atmosphérique (décrite dans l'annexe 2.4 du rapport) sont les suivantes :

- Les interactions des systèmes météorologiques avec la terre et la mer sont critiques. Elles déterminent la formation et le développement des structures de l'atmosphère produisant la propagation dite anormale.
- Pour des chemins de propagation maritime, le « ducting » fournit des périodes prolongées de signaux interférents avec des niveaux faibles à moyens le jour et des pics importants de puissance durant la nuit par réflexion/réfraction liée à la subsidence induite.
- Sur les zones terrestres, des signaux importants apparaissent durant les heures de pénombres du fait de la subsidence (déplacement d'air de l'atmosphère vers le sol) des couches élevées de l'atmosphère par rafraîchissement et des effets combinés des radiations nocturnes (transfert radiatif nocturne du sol vers l'atmosphère, dans le domaine des IR, de l'énergie solaire accumulée par la surface de la Terre dans la journée). De fait, l'implication de cet effet, dans la modélisation, dépend pleinement de la pertinence avec laquelle les irrégularités du terrain sont traitées. À ce titre, le rapport exprime clairement que : *« Elevated layer reflection and/or refraction" (rather than surface ducting) was confirmed as the dominant inland propagation mode, as suggested by Rue [1987]. »*. Bien que ce fait soit toutefois très estompé par d'autres études plus récentes (2009 - notamment celles de [9]) qui démontrent clairement l'existence fréquente de conduit à basse altitude sur les zones terrestres.

- Les côtes connaissent des conditions similaires à celles des zones terrestres avec des contributions additives de l'advection côtière.

Les équations, qui dictent le calcul des pertes de propagation anormales dans la **Recommandation UIT-R P.452**, sont originaires du travail effectué par le BTRL sur une fonction de Distribution Cumulative de Référence qui fut développée sur la base de l'ensemble des mesures effectuées lors des études du COST 210. Ce qui est intéressant, c'est que cette Fonction de Distribution Cumulative était totalement indépendante de la distance, de la fréquence et du type de chemin bien qu'elle fournissait malgré tout une approximation particulièrement bonne de la réalité. Cette Fonction de Distribution Cumulative ne fait pas de distinction entre propagations par conduit ou par couche de réflexion/réfraction. Par la suite, des améliorations dans la précision de modèle ont pu être faites par l'introduction des caractéristiques de la distribution en fonction de la distance ou de la valeur de $\beta(\%)$. La fonction de référence se base sur les deux paramètres L_{br} et $\beta(\%)$. L_{br} représente les pertes mesurées et s'il est sûr que pour des pourcentages faibles, ces pertes correspondent à de la propagation par conduit ou par réflexion sur les couches, pour des pourcentages forts, le modèle estime que l'atmosphère est en transition entre des états stratifiés et bien mélangés, ce qui signifie implicitement qu'une partie de la diffusion troposphérique (atmosphère bien mélangée) est prise en compte. En termes de modélisation, cet état de transition est quasiment impossible à modéliser par des modèles totalement déterministes et seule cette modélisation empirique permet de le prendre en compte.

Le chapitre 3 du rapport décrit clairement la procédure de prédiction. Toutefois, la **Recommandation UIT-R P.452** a nettement évolué au cours de ces deux dernières décennies et certains éléments ont été revus et modifiés. Il est par exemple intéressant de constater que dans les chemins de type transhorizon, la diffraction était considérée, à l'époque, uniquement si la distance entre l'émetteur et le récepteur était inférieure à 200 km et que toujours pour le même type de trajet, la diffusion troposphérique n'avait lieu que si la distance angulaire était supérieure à 8 mrad. Une comparaison avec la version 15 de la P.452 montre très clairement que ces conditions ont globalement disparu au profit d'équations beaucoup plus pertinentes (tenant compte de la distance angulaire, de l'indice de réfraction au niveau du sol ou dans les 100 premiers mètres de l'atmosphère). Le chapitre suivant propose de revoir ces modifications dans les grandes lignes.

Enfin et c'est sans aucun doute le plus important, le rapport du COST210 donne dans le Chapitre 5, les résultats de mesure sur l'ensemble des 54 liaisons (terrestres et maritimes) nécessaires à l'obtention et la validation des modèles de propagation. Les comparaisons entre les mesures et le modèle développé par le BTRL dont est issu la P.452 montrent des concordances particulièrement importantes quel que soit la fréquence ou le chemin de propagation (voir Annexe 6.3 pour les données de mesure). Le rapport fait bien entendu état de comparaison avec d'autres modèles de propagation (Longley-Rice, CCIR 569, modèle du SRT ou du CNET). Quel que soit l'écart entre mesures et résultat de modèle (de 1 à 10 dB), le modèle du BTRL présente toujours le plus grand nombre de concordances. En considérant par exemple, que le modèle est bon pour des erreurs de moins de 5dB, entre la mesure et la prédiction permet une bonne approximation dans 61% des trajets étudiés, elle est moyenne (de 5 à 10dB) pour 17% des cas et mauvaise (supérieure à 10 dB) pour 22% des cas. Notons toutefois que ces concordances sont associées au prédécesseur de la P.452 qui a depuis été affinée.

Historique des modifications/révisions de la P.452

Si la **Recommandation UIT-R P.452** a globalement évolué de nombreuses fois depuis son établissement (15 versions différentes), finalement le modèle de propagation anormale à quant à lui très peu été modifié structurellement depuis sa création. On peut noter toutefois :

- De nombreuses modifications de forme sont faites entre la version 6 (1994) et la version 7 (1995) (recombinaison des termes de pertes), mais aussi de fond et plus particulièrement sur le terme Γ exposant de la fonction $A(p)$ définissant la correction sur la distribution cumulative de la propagation anormale.
- Une seconde évolution du terme Γ entre la version 7 (1995) et la version 8 (1997), mais aussi une évolution dans le calcul de $\beta_0(\%)$ qui devient uniquement fonction de la latitude. Son calcul n'évoluera plus avec l'évolution des versions. La dernière modification concerne le terme μ_2 qui sera lui aussi définitivement modifié.
- Entre les versions 9 (1999) et version 13 (2007), la modélisation des propagations anormales n'évolue plus.
- La modification majeure de fond arrive avec la version 14 (2009). Celle-ci est liée à l'introduction d'une correction des pertes en fonction de la fréquence (introduction du terme A_f entre les versions 13 et 14). Cette révision a été introduite après qu'une étude anglaise [24] ait montré qu'à basse fréquence les pertes évaluées pour des pourcentages de temps faibles étaient particulièrement pessimistes (pertes peu élevées) et ceci du fait que les équations qui régissent le « ducting » ne prenaient pas en compte la relation qu'il existe entre hauteur du guide et longueur d'onde du signal. En effet dans §1.1, il est

précisé que globalement le guide doit présenter une hauteur au moins équivalente à 100 fois la longueur d'onde. Or à basse fréquence, cette condition n'est pas toujours respectée. C'est pourquoi la correction s'applique uniquement en dessous de 500 MHz. Ce qui revient à considérer que tous les conduits font au moins une hauteur de 60 m.

3.3.2 Modèle empirique : la Recommandation UIT-R P.1546

La **Recommandation UIT-R P.1546** est une méthode de prédiction pour les services terrestres (point à surface) dans l'encadrement 30 MHz-300 MHz. Cette recommandation est l'évolution de la **Recommandation UIT-R P.370**. Elle consiste globalement en des courbes qui représentent la force du champ EM pour 1kW de puissance effective rayonnée en fonction de nombreux paramètres (certaines courbes sont établies sur les mers, d'autres sur la terre). La recommandation est basée sur des extrapolations/interpolations des courbes empiriques élaborées à différentes fréquences (100, 600 et 200 MHz).

Les mesures (et donc les chemins, les caractéristiques des émetteurs) dont sont extraites les courbes de cette recommandation peuvent être trouvées dans le rapport du COST 210 [14]. Pour les courbes faites au-dessus des mers, c'est le réseau de la BBC (à 94, 187, 560 et 774 MHz) qui a été utilisé entre 1954 et 1963 sur 5 chemins de propagations présentant différentes longueurs et différentes hauteurs de récepteur. L'émetteur quant à lui était fixe et présent sur la côte des Pays-Bas à Scheveningen.

Des comparaisons entreprises entre les **Recommandations UIT-R P.1546** et **UIT-R P.1812** [25] ont montré la **Recommandation UIT-R P.1546** incluant les informations de profil de terrain était plus précise que la **Recommandation UIT-R P.1812** pour estimer les niveaux de champs du service de radiodiffusion en bordure de couverture. L'utilisation de ces facteurs de correction la rend adéquate à une utilisation dans les milieux urbains. Les pertes de propagation prédites par la **Recommandation UIT-R P.1546** sont aussi beaucoup plus élevées que dans le cas de la **Recommandation UIT-R P.1812**. Les comparaisons avec les données de mesure montrent une bonne estimation des valeurs trouvées par l'**UIT-R P.1812**.

Dans [26], des comparaisons sont faites entre des mesures et les différentes recommandations présentées au §3. Les mesures sont entreprises par l'intermédiaire d'émetteurs placés en France et des récepteurs situés en Angleterre. La comparaison des mesures avec les **Recommandations UIT-R P.1546** et **UIT-R P.1812** montrent que les prédictions faites sont globalement autour de 5dB des mesures pour des pourcentages de temps de 50 et 10% et supérieures de 8 à 9 dB pour 1% du temps.

Dans [27], D'autres comparaisons sont effectuées entre trois modèles de propagations (**UIT-R P.1546-5**, Longley-Rice et Hata-Davidson) et des mesures effectuées à la fois sur des trajets terrestres ou des trajets maritimes. Les résultats montrent des erreurs significatives (de 10 à 35 dB) entre la mesure et l'**UIT-R P.1546-5** (le modèle est utilisé pour un pourcentage de temps de 50%), notamment pour des trajets supérieurs à 50 km, alors que le modèle HATA-Davidson, alors que très simple d'utilisation donne pour ces cas des résultats assez proches de la mesure.

[28] propose une méthode d'optimisation pour ajuster les paramètres de la **Recommandation UIT-R P.1546-1** pour améliorer sa précision dans les bandes VHF et UHF. L'optimisation se fait par le biais d'algorithme génétique. Les résultats des comparaisons avec les mesures entreprises sur un réseau mobile CDMA dans un environnement rural montrent d'abord des divergences, qui peuvent être importantes, entre les prédictions de la **Recommandation** non optimisée et la mesure (erreur moyenne de 13dB) et ensuite une amélioration de la prédiction par les résultats de la recommandation optimisée.

Dans un rapport public du GRMT demandé par l'OFCOM en 2007 [29], des comparaisons sont entreprises entre les **Recommandation UIT-R P.1546-3** et **UIT-R P.452-12**. Le rapport est déjà particulièrement clair sur les modalités d'utilisation de chacune des recommandations, point à point et réciproque pour la P.452, point à zone et non réciproque pour la P.1546. Le rapport précise bien entendu que la comparaison reste délicate puisque ces deux outils n'ont pas la même fonction. Les comparaisons de simulation sur les pertes associée aux conditions atmosphériques montrent que la **Recommandation UIT-R P.1546-3** donne des pertes supérieures à celles simulées par l'**UIT-R P.452-12**. La comparaison des résultats de simulation entre 30 et 3000 MHz (zone couverte par les deux recommandations) et les mesures disponibles par le biais de la **Recommandation UIT-R P.311-7** montre clairement que les la **P.452** approche les valeurs de mesure (en tenant compte des circonstances d'élaboration des mesures et notamment les transmetteurs étaient coupés durant la nuit – période propice aux propagations anormales) alors que la **P.1546** surestime grandement ces pertes. Toutefois, le rapport montre déjà en 2007 que la **Recommandation UIT-R P.452-12** sous-estime grandement les pertes aux fréquences basses (ce qui est en totale corrélation avec la partie relative à l'historique des révisions de la P.452 qui a depuis été modifiée)

Dans un autre rapport public de l'agence des radiocommunications du ministère des affaires économiques des Pays-Bas, des comparaisons ont été entreprises entre mesures et simulations entreprises par l'intermédiaire de la **Recommandation UIT-R P.1546-4**. Les mesures ont été élaborées dans la bande UHF dans différentes configurations de terrain. Dans une première partie de ce rapport, les experts font mention du fait que la **Recommandation UIT-R P.1546** est « une simplification colossale de la réalité ». Une étude approfondie des comparaisons entreprises dans de document révèle des résultats assez problématiques : sur les liens fixes, les valeurs de pertes rendues par la **P.1546-4** ne correspondent pas aux mesures pour 31 sites sur 55 avec des écarts qui peuvent être très importants (parfois 20 dB de marge positive). Un résultat similaire est obtenu sur les liens maritimes (pourtant ne nécessitant pas de réelles modifications des courbes de la **P.1546** par les Annexes).

Récemment, à la CE3 (Commission d'Etude 3 de l'ITU), des révisions ont été demandées par la délégation britannique notamment sur l'ajout d'une annexe permettant de tenir compte des effets de propagation anormale et plus particulièrement sur l'ajustement des indices de réfraction pour des pays au climat non tempéré.

IV - Conclusion

4.1 Conclusion sur les phénomènes de propagation anormale

Si les phénomènes liés aux conditions de propagation anormale peuvent apparaître plus ou moins fréquemment en fonction de différents facteurs, cela ne signifie en rien que la propagation de type anormale suive une fréquence d'apparition identique. Ce rapport montre très clairement, qu'au-delà de l'inversion du gradient d'indice de réfraction, d'autres facteurs sont particulièrement nécessaires pour que les conditions de propagation anormale soient atteintes comme l'angle d'incidence de l'onde sur le conduit ou sur la couche de réflexion/réfraction, sa fréquence, le niveau de rugosité du terrain traversé par l'onde, etc...

La difficulté principale auquel est assujéti ce rapport est la compréhension physique de l'évolution de la Fonction de Distribution Cumulative des pertes en fonction du pourcentage de temps. En effet, les états « transitoires » de l'atmosphère étant particulièrement complexes, il est quasiment impossible de les modéliser par des moyens déterministes ce qui ne permet pas d'en avoir une représentation visuelle. Cet état de fait est clairement spécifié dans le rapport du COST 210.

Ce rapport montre que la stratification de l'atmosphère permet d'obtenir trois phénomènes de propagation nommés différemment, mais qui ont les mêmes causes : la propagation par conduit, la propagation par réflexion/réfraction sur les couches élevées et enfin la propagation par multitrajet. Les deux premières apparaissent sur des chemins transhorizons, alors que la dernière est caractéristique des chemins en visibilité entre l'émetteur et le récepteur. Pour l'ensemble de ces propagations, les pertes peuvent être inférieures à ce qu'elles sont en espace libre.

Les études relatives à l'apparition des conditions de propagation anormale ont montré que ces phénomènes étaient particulièrement liés à des conditions anticycloniques, que leur occurrence était nettement plus importante sur les mers que sur terre. Sur terre, et plus particulièrement en France, ces phénomènes apparaissent plus particulièrement à basse altitude (conduit de surface ou surface élevée) la nuit (par radiations nocturnes) et à plus haute altitude, le jour par des phénomènes de subsidence. Il est intéressant de noter que ces phénomènes sont inexistantes durant les périodes d'ensoleillement maximum (à midi). Ces conduits peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines de kilomètres de long (voir parfois quelques centaines).

Si les statistiques présentées dans la **Recommandation P.453** ont été élaborées par radiosonde sur un très grand nombre de sites durant deux décennies, il y a fort à croire qu'elles donnent une idée assez générale de la situation mondiale, bien qu'elles semblent par leur moyen de mesure peu précises. Elles minimisent sans doute la réalité car il est peu probable que les conduits ayant une existence courte aient été répertoriés. La seule méthodologie de mesure raisonnable et indiscutable réside donc dans une mesure continue car comme ce rapport l'a montré, la fluctuation de la force des canaux de propagation évolue constamment.

4.2 Conclusion sur les modèles de propagation anormale

Il convient de rappeler en tout premier lieu que l'utilisation de modèle permet uniquement d'obtenir une estimation du comportement réel des éléments physiques étudiés. Un modèle est un outil qui a nécessairement des bornes/limites d'utilisation. Il a été montré et démontré que les modèles purement déterministes, s'ils permettaient d'obtenir le comportement des ondes de façon très « réaliste », souffraient toutefois d'au moins deux problèmes (particulièrement « problématiques » pour l'ingénieur du spectre) : le premier étant lié à des conditions de propagation « épurées », le second, associé au premier étant l'impossibilité, pour des raisons de

complexité de calcul, « d'entacher » ces conditions ou de les rendre plus complexes... (ex : changer la nature et la conductivité des sols, mais aussi la valeur de l'indice de réfraction le long du chemin de propagation). La propagation reste, en dehors de conditions maîtrisées en laboratoires, un phénomène particulièrement complexe. Tout comme dans le domaine des équipements hyperfréquences, le modèle déterministe est un atout puissant pour comprendre le fonctionnement EM des structures élaborées, pour visualiser la répartition des champs et en extraire si possible des éléments d'analyse et/ou d'optimisation. Mais dans le cas de la propagation, comme dans le cas de l'élaboration d'équipement, seule la mesure fait foi.

Comme il l'a déjà été rappelé, les modèles semi-déterministes et/ou empiriques, ont la particularité de se baser directement sur l'observation des phénomènes physiques mis en jeu et s'apparentent donc toujours à la mesure. Ils ont comme atout principal de ne pas être en mesure de distinguer la complexité des scénarii, ce qui leur confère une force majeure par rapport au modèle purement déterministe. En effet, certaines conditions de stratification de l'atmosphère, particulièrement complexes, ne sont pas modélisables d'un point de vue déterministe. La mesure (bien faite) restant par nature, la seule référence à toute chose, les modèles empiriques peuvent donc clamer que leur origine provient de sources indiscutables. Toutefois, l'obtention d'un modèle généraliste, passe nécessairement par différents processus mathématiques : approximation (qui peut être polynomiale), extrapolation, interpolation...etc... ce qui confère donc au modèle une capacité à la généralisation, mais en contrepartie, une perte de distinction des cas particuliers. Dans le cadre de l'étude sur le modèle de propagation anormale associé aux **Recommandations UIT-R P.452, P.1812 ou P.2001**, cela signifie donc que dans la majorité des cas, le modèle devra rendre des résultats en adéquation avec la mesure. Toutefois, certains cas « pathologiques » pourront être totalement divergents.

D'un point de vue général, les modèles de propagation doivent tenir compte des conditions de propagation anormale. Ce fait reste, à ce jour, totalement indiscutable (et d'autant plus indiscutable que le chemin de propagation est transhorizon). La pertinence et la précision des modèles de propagation résident uniquement dans leur faculté à modéliser convenablement (d'un point de vue de l'amplitude et de la probabilité) les propagations anormales et plus généralement les pertes associées aux incidences climatiques (diffusion troposphérique, conduits, multitrajet...). Dans le cadre de l'étude sur le modèle de propagation anormale associé aux **Recommandations**, il a été possible de constater que l'obtention de ce dernier par des données empiriques ne permettait pas réellement de discerner pour des pourcentages de temps forts, ce qui appartenait encore aux phénomènes de « ducting », de ce qui appartenait au phénomène de diffusion troposphérique. Finalement d'un point de vue physique, mais aussi de la météorologie, il est difficile de concevoir que ces deux phénomènes soient indépendants. La diffusion troposphérique (atmosphère totalement mélangée et homogène) prévaut généralement entre un émetteur et un récepteur distant l'un de l'autre au-delà de l'horizon, sauf lorsque l'atmosphère se stratifie, c'est alors que les conditions de propagation par conduit et/ou surface de réfraction/réflexion apparaissent. Le degré de stratification, ainsi que son amplitude définit globalement l'évolution de la CDF (Fonction de Distribution Cumulative) associée aux conditions atmosphériques. Autrement dit, un modèle de propagation qui ne prendrait pas en compte la CDF des pertes associées à l'évolution des conditions atmosphériques/climatiques ne serait pas plus utile à l'ingénieur du spectre, qui cherche les pertes sur un chemin transhorizon, qu'un marteau sans manche à tout Compagnon charpentier.

Le modèle proposé dans les recommandations en question présente des atouts non négligeables et une pertinence physique importante. En effet, la clef du modèle réside dans sa Fonction de Distribution Cumulative dont le point central est un couple de valeur associant une probabilité que les conditions (atmosphérique et de couplage) d'accès à la propagation anormale soient pleinement satisfaites avec une perte de propagation calculée dans ces conditions optimales et donc modélisable très simplement au moyen d'équations déterministes. Par la suite, le modèle permet d'estimer par le biais de cette Fonction de Distribution Cumulative, les pertes associées aux états transitoires de l'atmosphère (mi-stratifiée, mi-homogène) en fonction du pourcentage de temps considéré.

Cette méthodologie de modélisation paraît particulièrement pertinente, et d'autant plus que l'observation des résultats de mesure montre clairement des évolutions homothétiques des CDF en fonction des différents paramètres caractérisant la propagation. Elle tient compte du pourcentage de temps de présence de conduits de propagation et/ou de couches de réfraction/réflexion auquel est associé une « probabilité » de couplage à ces éléments selon la nature du trajet que doit emprunter l'onde EM entre l'émetteur et le récepteur.

L'ensemble du dépouillement effectué sur le modèle issu des **Recommandations UIT-R P.452, P.1812 ou P.2001** n'a pas permis de mettre en évidence des éléments qui pourraient remettre en cause fondamentalement la véracité des prédictions faites, Ceci est appuyé par le fait que les comparaisons entreprises dans les Annexes (§6.4) entre mesure du COST210 et modèle donne des résultats assez probants. Toujours sur la base des éléments du rapport du COST210, l'observation des 64 comparaisons proposées entre mesures et modèles de prédiction ne permet en rien de remettre en cause le modèle proposé par le BRTL sur les phénomènes de propagation anormale. Modèle à l'origine de celui étudié dans ce rapport (s'il existe des divergences parfois, elles restent anecdotiques).

Sur la **Recommandation UIT-R P.1546**, comme ce rapport le montre les avis sont particulièrement mitigés sur la véracité de ces prédictions. L'analyse de cette recommandation dans ce rapport a été confrontée à un manque de données sur l'élaboration même de cette dernière (au moins sur les mesures pour les trajets terrestres) et sur les méthodologies d'interpolation/ d'extrapolation à l'origine des Annexes permettant de trouver les pertes au pourcentage de temps considéré. Aussi à ce stade, il est difficile de conclure avec pertinence sur les capacités réelles de cette recommandation.

V - Bibliographie

- [1] – L. Boithas : “Propagation des ondes radioélectrique”, technique de l'ingénieur.
- [2] – B. W. Atkinson & M. Zhu: “Coastal Effects on Radar Propagation in atmospheric ducting conditions”, *Journal of Applied Meteorology*, vol.13, pp.53-62, September 2006.
- [3] – A. L. Martin, “VHF and Microwave Propagation Characteristics of Ducts”, *Amateur Radio*, Vol. 73, pages 1-11, January 2007
- [4] – Ian M. Brooks, A.K. Gorooh & D. P. Rogers, “Observations of Strong Surface Radar Ducts over the Persian Gulf”, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.38, pp.1293-1310, September 1999
- [5] – H.T. Dougherty & E.J. Dutton, ”The Role of Elevated Ducting for Radio Service and Interference Fields” NTIA-Report-81-69, March 1981.
- [6] – H.T. Dougherty & B.A. Hart, ”Recent Progress in Duct Propagation Predictions”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-27, p. 542-548, July 1979.
- [7] – B. W. Atkinson & M. Zhu, “Radar-duct and boundary-layer characteristics over the area of The Gulf”, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2005), **131**, pp. 1923–1953, November 2004.
- [8] – IEEE Std. 211-1997:”IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation”
- [9] – P. Lopez, ”A 5-yr 40-km-Resolution Global Climatology of Super refraction for Ground-Based Weather Radars”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 48, pp 89-110, January 2009.
- [10] – V. Kvicera, P. Pechac, O. Jicha, “On the Short-term Time Evolution of Elevated Ducting Layers”, *Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, November 2012
- [11] – T. G Hayton & K H Craig, “Use of Radiosonde Data in Propagation Prediction”, *Remote Sensing of the Propagation Environment* (Digest No: 1996/221), IEE Colloquium on, pp1-6, Nov 1996.
- [12] – H. V. Hitney and R.Vieth, “Statistical Assessment of Evaporation Duct Propagation”, *IEEE trans. On Antennas and Propagation*, Vol.38, No.6, June 1990.
- [13] – J. S. Nicolis, “Systematic Long-Term Duct Propagation Conditions Over a VHF Overhorizon Path between Greece and Italy”, *IEEE Trans. On Antenna and Propagation*, Vol. Ap-15, No. 2, March 1967
- [14] – Commission of the European Communities, information Technologies and Sciences, “COST 210: Influence of atmosphere on interference between radio communications systems at frequency above 1GHz “.
- [15] – E. E. Gossard, ” Clear weather meteorological effect on propagation at frequencies above 1 GHz”, *Radio Science*, Vol.16, N° 5, pages 589-608, September-October 1981.
- [16] – D. Gunashekar, DR Siddle and E. M. Warrington: “Transhorizon Radiowave Propagation due to Evaporation Ducting”, *Resonance*, pp 51-52, January 2006.
- [17] – Les W. Barclay: “Propagation of Radiowave”.
- [18] – C. G. Migliora, L. B. Felsen and S. H. Cho, “High Frequency Propagation in a Elevated Tropospheric Duct”, *IEEE Trans. On Antenna and Propagation*, vol. AP-30, No.30, pp 1107-1120, November 1982.

- [19] – O. Ozgun, “Recursive Two-Way Parabolic Equation Approach for Modeling Terrain Effects in Tropospheric Propagation”, *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, Vol.57, No.9, September 2009.
- [20] – F. Akleman and L. Sevgi, “A novel finite-difference time domain wave propagator,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 48, No. 3, page 839–843, 2000.
- [21] – S. A. Isaakidis and T. D. Xenos, “Parabolic Equation Solution of Tropospheric Wave Propagation Using FEM”, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 49, page 257-271, 2004.
- [22] – I. Sirkova, M. Mikhalev, “Parabolic Wave Equation Method Applied to the Tropospheric Ducting Propagation Problem: A Survey”, *Electromagnetics*, Vol.26, Issue 2, page 155-173, 2006
- [23] – O. Ozgun, G. Apaydin, M. Kuzuoglu, L. Sevgi, “PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radio wave propagation over variable terrain”, *Comput. Phys. Commun*, Volume 182, Issue 12, Pages 2638–2654, December 2011.
- [24] – Aegis System, “Ducting models at VHF”, pp.1-28, 2011.
- [25] – L. Paunovska, L. Gavrilovska, “Comparison of Propagation Model ITU-R-P.1546 AND ITU-R-P.1812”, *Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE)*, 2014 4th International Conference on , pp.1-5, 11-14 May 2014.
- [26] – R. Rudd, “Statistics of Anomalous Tropospheric Propagation at UHF frequencies”, *IEEE Antennas and Propagation*, 2009. EuCAP 2009, 3rd European Conference on, pp 3862 – 3864, 23-27 March 2009.
- [27] – S. Kasampalis, P.I. Lazaridis, Z.D. Aaharis, A. Bizopoulos, S. Zettas & J. Comas: “Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson Propagation Model for DVB-T Coverage Prediction”, *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2014 IEEE International Symposium on , pp.1-4, 25-27 June 2014.
- [28] – K. Paran & N. Noori, “Tuning of the propagation model ITU-R P.1546 Recommendation” *Progress In Electromagnetic Research B*, Vol.8, pp.243-255, 2008.
- [29] – K. Craig and M. Willis, “Propagation Model Development”, *GRMT Final Report - Annex B*, Version 1, pp.01-105, March 2007

VI - Annexes

6.1 Les données du gradient d'indice de réfraction en France

Cette annexe donne l'ensemble des représentations des différentes grandeurs disponibles dans la **Recommandation UIT-R P.453**. Cette première partie s'axe sur les données relatives au gradient d'indice de réfraction non dépassé durant 1, 10, 50 et 90% du temps

Figure A1 : Gradient du coïncide dN_1 non dépassé pendant 1% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère. Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe. (Unité N/km)

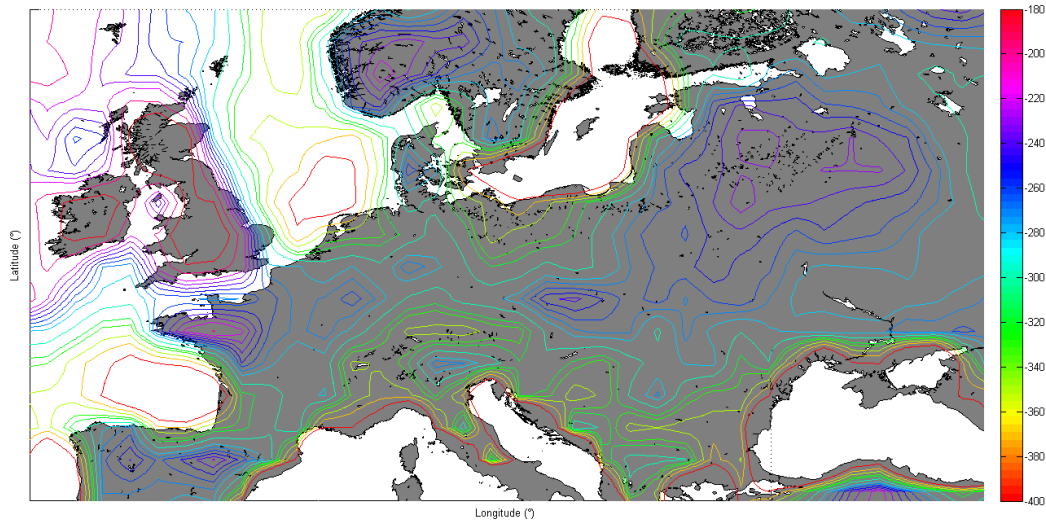
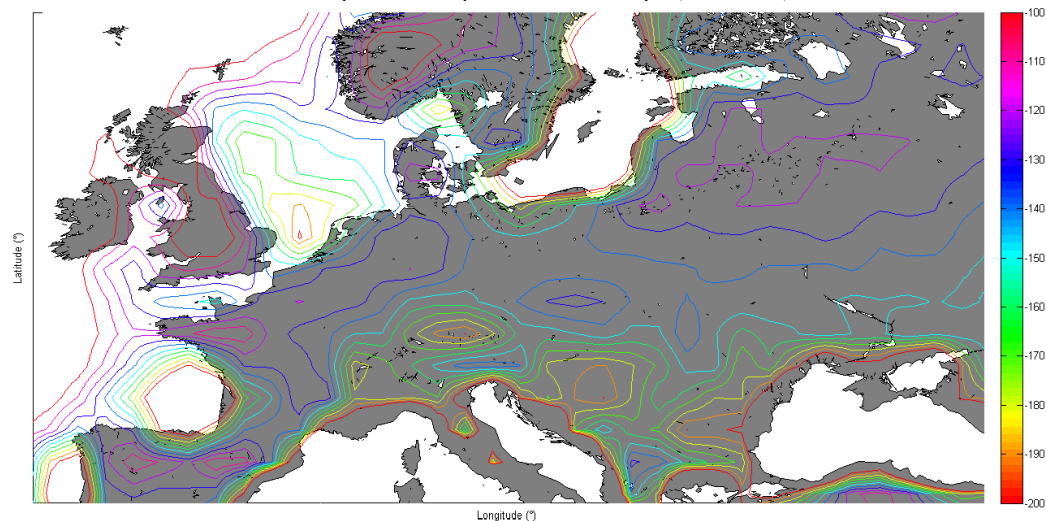


Figure A2 : Gradient du coïncide dN_1 non dépassé pendant 10% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère. Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe. (Unité N/km)



Ce rapport mentionne dans la partie 3.3.1 que le paramètre β_0 (%) est disponible sous forme de formule dans les **Recommandations UIT-R P.452 et UIT-R P.1812** et sous forme de carte dans la **Recommandation UIT-R P.453**. Il convient de rappeler que β_0 (%) est le pourcentage de temps durant lequel le gradient d'indice de réfraction est inférieur à 100 N/km. Il est donc particulièrement intéressant de constater que sur la France et plus généralement en Europe, 10% du temps, le gradient d'indice est compris entre -200 N/km (côte basque) et -100 N/km (Bretagne). Ce qui permet notamment d'assurer que des conditions de propagation guidée ou de superréfraction soient accessibles durant ce laps de temps.

La Fig.A3 permet de constater que dans 50% du temps, les conditions atmosphériques, et notamment l'évolution de l'indice de réfraction sont telles que l'atmosphère peut être considérée comme normale. Les variations de l'indice de réfraction sont de l'ordre de -60 N/km (côte basque) à -45 N/km (Bretagne). On notera par ailleurs en France, que quel que soit le pourcentage de temps considéré, les maxima se situent sur les côtes landaises, alors que les minima sont plutôt localisés dans les régions bretonnes.

Figure A3 : Gradient du coïncide dN , non dépassé pendant 50% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère. Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe. (Unité N/km)

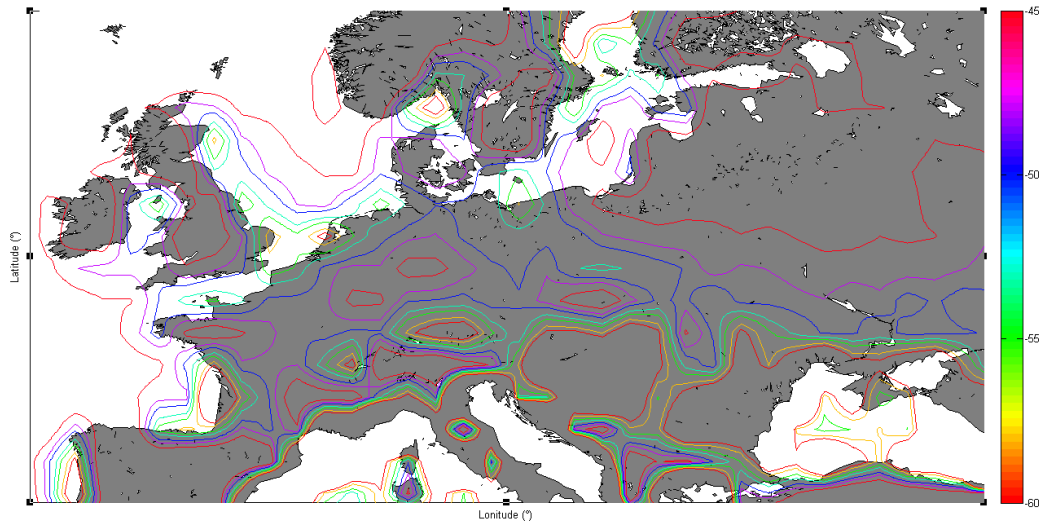
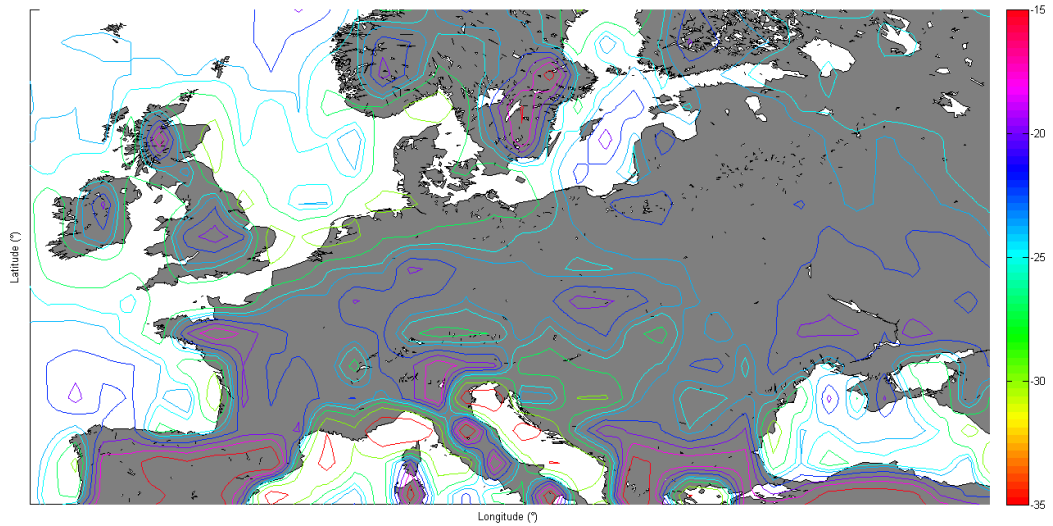


Figure A4: Gradient du coïncide dN , non dépassé pendant 90% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère. Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe. (Unité N/km)



6.2 Les données des conduits de propagation en France

Cette première partie s'axe sur les données relatives à la hauteur moyenne annuelle et la force des différents types conduits.

Figure A5: Moyenne annuelle de l'épaisseur des conduits élevés (en mètre). Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe.

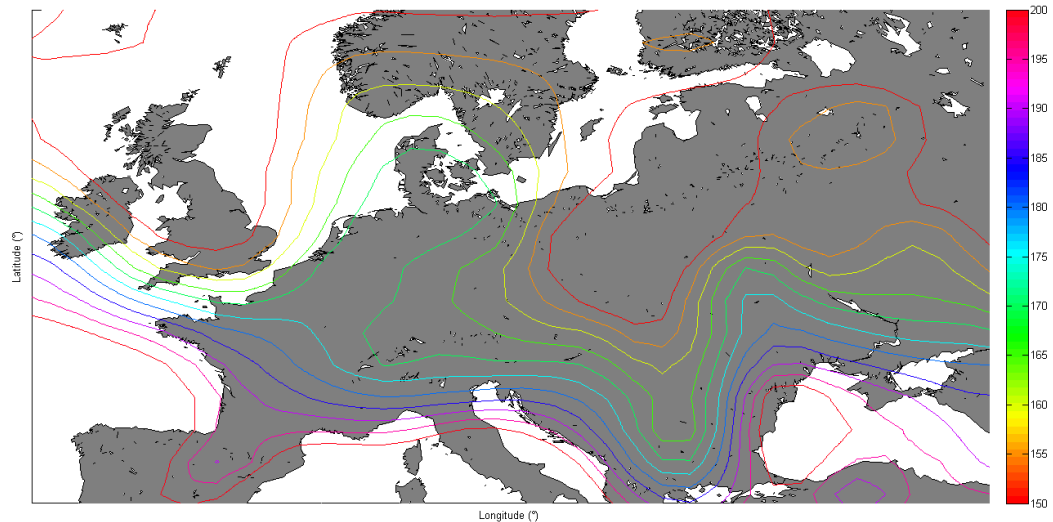


Figure A6: Moyenne annuelle de l'épaisseur des conduits surface (en mètre). Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe.

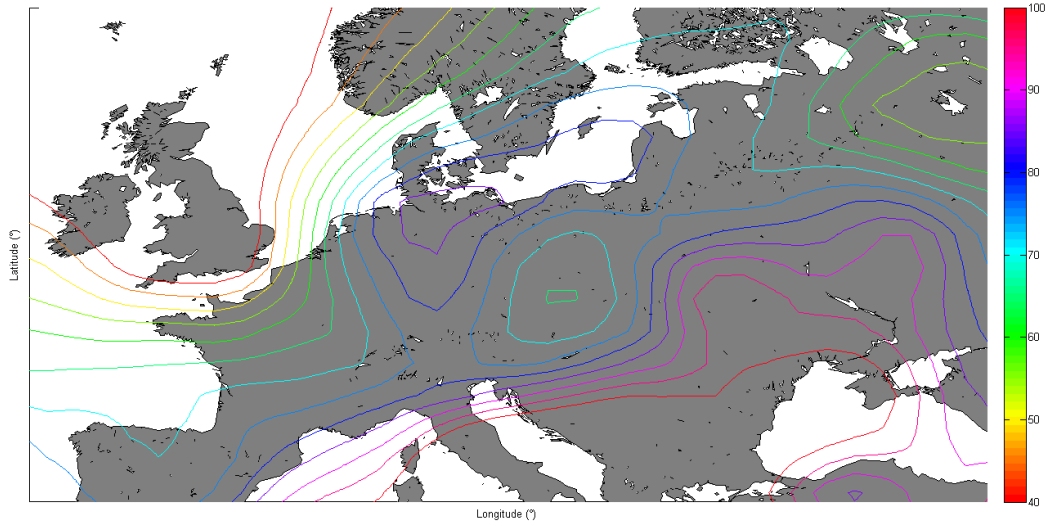


Figure A7: Moyenne annuelle de la hauteur de la base des conduits élevés (en mètre). Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe.

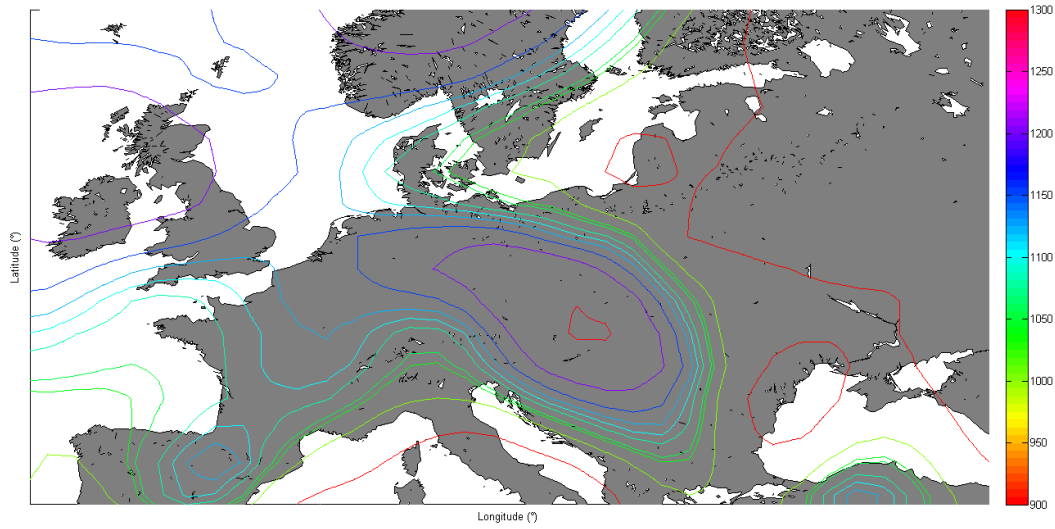


Figure A8 Moyenne annuelle de la force des conduits élevés (en unité M). Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe.

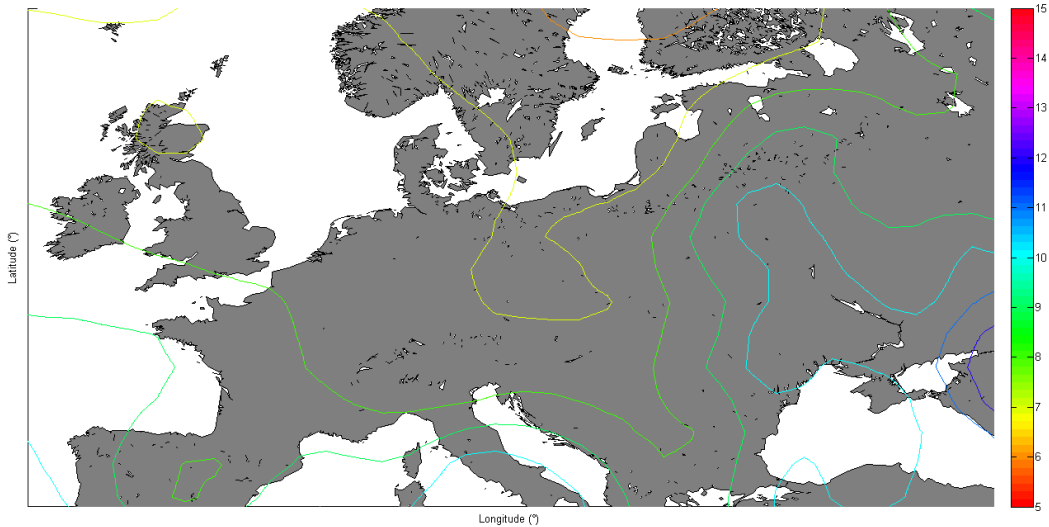
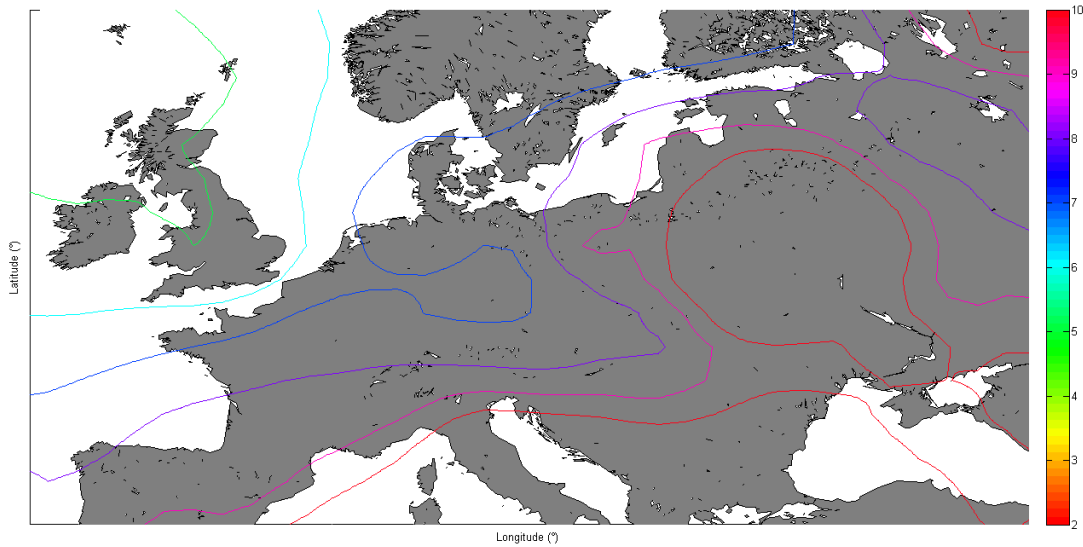


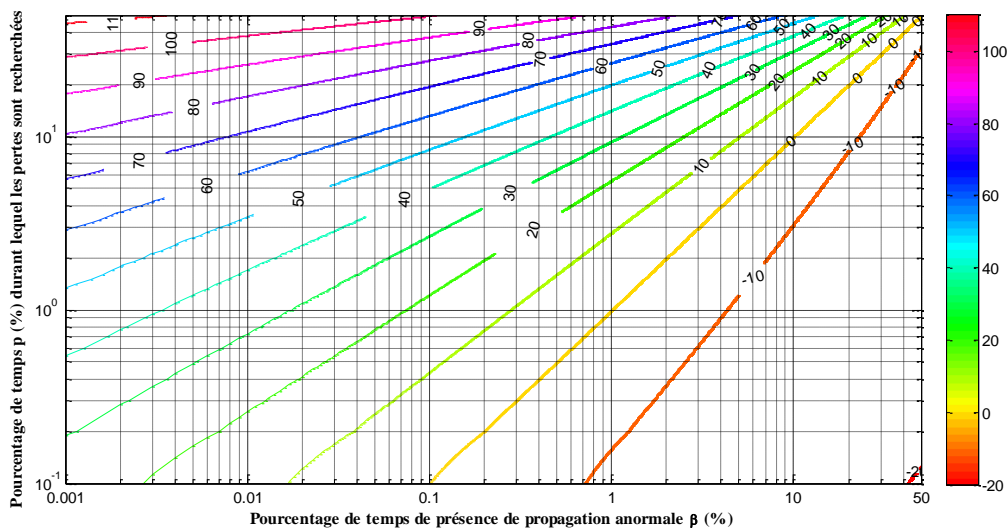
Figure A9: Moyenne annuelle de la force des conduits surfaciques (en unité M). Donnée relevée par la mesure pour la France / Europe.



6.3 Etude des éléments $A(p)$ en fonction de $\beta(\%)$ et $p(\%)$

Cette annexe permet d'avoir une idée relative du comportement de la fonction $A(p)$ détaillé dans la section 3.3.1.3. La fonction couvre une gamme de l'ordre de -10 à plus de 110 dB d'atténuation supplémentaire. Cette représentation peut permettre une utilisation comme abaque.

Figure A10: Evolution de la fonction $A(p)$ en fonction de $\beta(\%)$ et $p(\%)$



6.4 Dépouillement & Analyse des mesures du COST210

Le rapport du COST210 met à disposition dans les Annexes, l'ensemble des mesures effectuées pour tester les différents modèles qui ont permis d'aboutir à la **Recommandation UIT-R P.452**. La figure A11 présente une partie de ces mesures. La première série de courbe (élaborée à l'aide de carrés) correspond aux mesures faites sur des propagations principalement maritimes. Il est intéressant de constater tout d'abord que l'ensemble des courbes est compris entre les représentations de $A(p)$ pour $\beta=10\%$ (maximum de la valeur pour l'Europe - $\mu_4=1$ - en considérant une propagation sur la mer de plus de 75% et une distance de côte de moins de 5 km, μ_1 est proche de 1, pas de rugosité $\mu_3=1$, seul μ_2 est plus compliqué à déterminer, mais doit être proche de 1) et $\beta=1\%$ (minimum sur la mer pour des distances de l'ordre de 200 à 300 km par évolution de μ_2). La Fig.A11 montre bien que l'évolution du « facteur de propagation » (ici, il faut comprendre le terme comme l'évolution des pertes

supplémentaires à ce qu'elles sont dans le conduit de propagation) est quasi-indépendant de la distance et/ou de la fréquence (par comparaison des chemins N°50 et 51 et/ou N°45 et 46).

Figure A11: Evolution du facteur de propagation en fonction du pourcentage de temps (données de mesure)

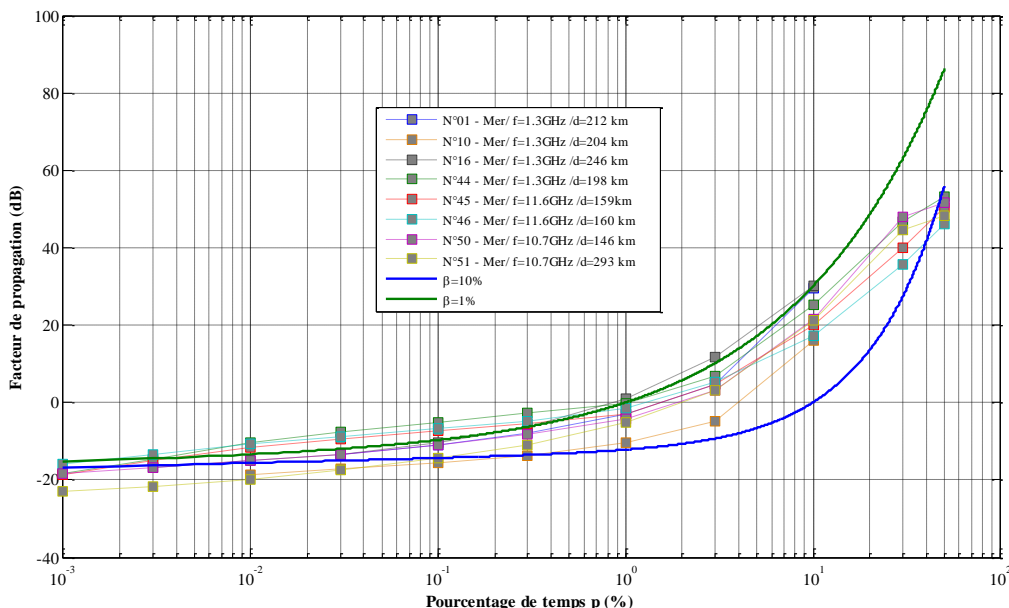
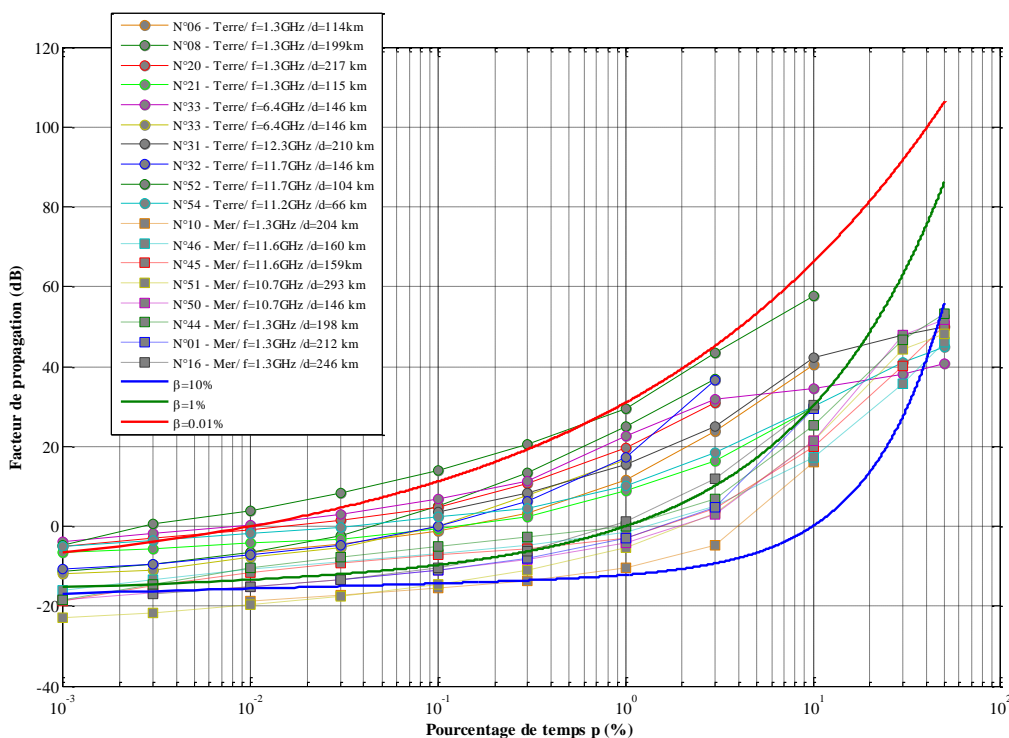


Figure A12: Evolution du facteur de propagation en fonction du pourcentage de temps (données de mesure)



Il est possible par ailleurs de constater que la dynamique des courbes mesurées et simulées est très proche notamment sur des pourcentages de temps inférieur à 10%, cela est en parfaite adéquation avec le fait que la fin de la courbe de $A(p)$ n'est pas totalement représentative des pertes par diffusion troposphérique (voir Fig.19). Une remarque absolument identique peut être faite sur la Fig.A12. Cette dernière présente la comparaison de certaines mesures extraites du rapport du COST 210 élaborée sur mer et/ou sur terre et dans certains cas, le changement de dynamique apparaît pour des pourcentages de temps plus faibles, entre 3% (cas du chemin N°33) et 10% du temps (cas du chemin N°52) (il est possible de constater une diminution nette de la dynamique – forme de plateau qui représente « l'entrée » dans les pertes troposphériques pures pour des pourcentages de temps forts).