



Ionosferische reflectie en refractie in een notendop Réflexion et réfraction ionosphérique en bref

door/par ^AON4PN-Maurits

Inleiding

Daar iedere radioamateur in de HF-banden werkt of er mee begint is het toch wel interessant te weten wat er met onze radiogolf gebeurt nadat die onze zendantenne verlaat en in de ionosfeer terecht komt. Daarin probeert dit resumé enige verklaring te geven.

Ionosferische reflectie en refractie

Reflectie (spiegeling) en refractie (breking) zijn belangrijke begrippen die men eerst moet verstaan vooraleer ionosferische radiopropagatie begrepen kan worden en dit voor elk nuttig gebruik.

Om met deze begrippen te kunnen omgaan, is het wenselijk het idee te aanvaarden van een lichtstraal (of enkelvoudige bundel van licht) en wat er gebeurt wanneer een lichtstraal verschillende soorten van materialen raakt of treft (of er doorheen gaat).

Wanneer een lichtstraal een hoog gepolierd oppervlak raakt, zoals een verchromd oppervlak, zullen de lichtstralen die op dit oppervlak terecht komen gereflecteerd worden. Er gaat geen licht in of doorheen het geschroefde oppervlak, te wijten aan de ondoordringbaarheid van het gepolierde oppervlak. Meer nauwkeurig, als een straal invalt op een gepolierd oppervlak onder een hoek van 5° , dan zal de gereflecteerde straal ook een hoek van 5° maken. Overeenkomstig zal de lichtstraal die de spiegel onder een hoek van 90° raakt (loodrecht op het spiegeloppervlak) gereflecteerd worden in een volledig omgekeerde richting en terug keren langs dezelfde weg waarvan hij gekomen is. Dit is de reden waarom het mogelijk is jezelf in de spiegel te zien.

In Fig.1 is te zien dat de terugkaatsingshoek gelijk is aan de invalshoek. Dezelfde beginselen gelden voor de meeste gepolierde oppervlakken, ondoorzichtig of niet. Bijvoorbeeld, is het mogelijk jezelf te zien in een uitstalraam, nochtans kunnen mensen in de winkel doorheen het raam naar buiten kijken.

Gereflecteerde stralen zijn gemakkelijk te berekenen, gereflecteerde stralen veel moeilijker.

Reflectie, in praktische zin, is zo iets als een proces van buiging. Of-schoon licht zich rechthoekig verplaatst, kan licht afgebogen worden wanneer het door materiaal gaat met verschillende dichtheden. Bijvoorbeeld, wanneer je een potlood neemt en het in een bokaal met water steekt onder een hoek, zal het potlood afgebogen kijken bij de grens tussen lucht en water, in werkelijkheid is het potlood evenwel vast en recht. Ook een lichtstraal dat water onder een hoek raakt zal van richting schijnen te veranderen of afbuigen bij de grens tussen licht en water.

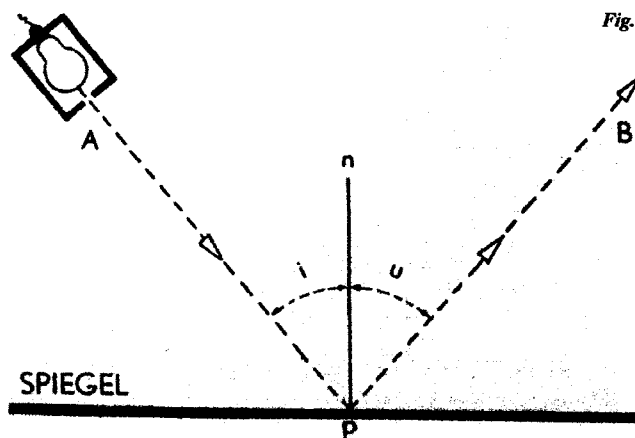


Fig. 1

Fig.2 toont ons breking of refractie. De hoek tussen de invallende straal en de normaal (n) noemen we de invalshoek (i), de hoek tussen de normaal (n) en de gebroken straal is de brekingshoek (r). De reden dat een potlood lijkt af te buigen komt doordat het licht bij de grens tussen lucht en water van richting verandert of breekt. In werkelijkheid, een straal

Introduction

Pour tous les radioamateurs qui travaillent en HF ou qui débutent, il est intéressant de savoir ce qui se passe avec nos ondes radio lorsque celles-ci ont quittées nos antennes et arrivent dans l'ionosphère. Ce résumé tentera d'y apporter quelques éclaircissements

Réflexion et réfraction de l'ionosphère

Réflexion (effet miroir) et réfraction (cassure) sont des éléments importants que nous devons d'abord comprendre afin de pouvoir comprendre la radio propagation ionosphérique.

Afin de pouvoir utiliser ces concepts, il est souhaitable d'accepter l'idée d'un rayon lumineux (ou un simple éclair de lumière) et ce qui arrive lorsqu'un rayon lumineux effleure, touche (ou traverse) des matériaux divers.

Lorsque un rayon lumineux touche une surface polie, tel qu'une surface chromée, les rayons qui touchent cette surface seront réfléchis. Il n'y a aucune lumière qui traversera ou rentrera dans la surface chromée, à cause de l'imperméabilité de la surface polie. Plus précisément, si un rayon atteint une surface polie sous un angle de 5° , le rayon réfléchi fera également un angle de 5° .

De même, le rayon qui atteint le miroir sous un angle de 90° (perpendiculaire à la surface du miroir) sera réfléchi dans la même direction et prendra le même chemin pour le retour qu'à l'aller.

C'est pour cette raison qu'il vous est possible de vous voir dans un miroir.

Dans la Fig.1 on peut voir que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Les mêmes principes valent pour la plupart des surfaces polies, transparentes ou non. Par exemple, il est possible de vous voir dans une vitrine d'étalage, et les personnes se trouvant dans le magasin peuvent voir l'extérieur à travers la vitre. Les rayons réfléchis peuvent être facilement calculés, les réfractés beaucoup moins.

En pratique, la réflexion est quelque chose comme un procédé d'inclination. Quoique la lumière se déplace en ligne droite, elle peut se fléchir lorsqu'elle traverse des matériaux de diverses densités.

Par exemple, lorsque vous trempez un crayon dans un bocal rempli d'eau sous un angle, il paraîtra courbé près de la frontière entre l'eau et l'air; en réalité le crayon est bien droit. Il en sera de même pour un rayon lumineux qui touche de l'eau sous un certain angle.

La Fig.2 nous montre une réflexion ou une cassure. L'angle formé par le rayon entrant et la normale (n) est appelé angle d'incidence (i), l'angle entre la normale (n) et le rayon brisé est l'angle de cassure (r).

La raison pour laquelle un crayon semble se courber vient du fait que la lumière, à la frontière de l'air et de l'eau, change de direction ou se

die een oppervlak raakt dat niet geheel ondoordringbaar is, kan ofwel reflecteren ofwel breken. Beschouw, bijvoorbeeld, wat er gebeurt met de bokaal met water. Wanneer het oppervlak van het water stil is, is het mogelijk reflecties in het water te zien (zoals je gezicht). Op hetzelfde ogenblik is het mogelijk een muntstuk te zien dat men op de bodem in de bokaal heeft gelegd. Lichtstralen zijn ofwel reflecterend aan het oppervlak van het water, dat toelaat je eigen reflectie te zien, ofwel worden lichtstralen gereflecteerd in het water en reflecteren terug, zodat het je toelaat het muntstuk te zien.

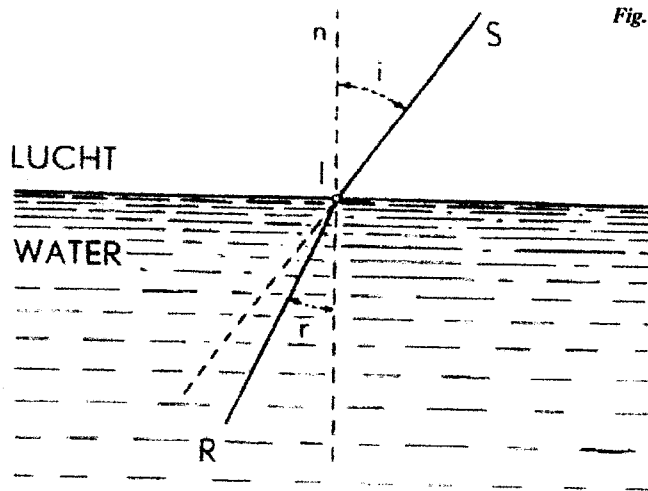


Fig. 2

casse. En réalité, un rayon qui atteint une surface qui n'est pas complètement impénétrable peut soit se réfléchir soit se briser. Regardons par exemple ce qui se passe avec le bocal rempli d'eau. Lorsque la surface de l'eau est calme, on peut voir des réflexions (votre visage). En même temps, il est possible de voir une pièce de monnaie déposée au fond de l'eau. Les rayons lumineux sont soit réfléchissants à la surface de l'eau, ce qui permet de se voir, ou bien les rayons sont brisés dans l'eau et réfléchissent, laissant voir la pièce de monnaie au fond de l'eau. L'angle sous lequel un rayon est réfléchi dépend de la vitesse de la

De graad bij hetwelk een lichtstraal refracteerd is afhankelijk van de lichtsnelheid binnen het materiaal waar refractie plaats vindt, vergeleken met de lichtsnelheid in het materiaal waar de straal ontstaat. Het is ook afhankelijk van de golflengte van het licht dat doorheen de twee materialen of media gaat.

De lichtsnelheid in het materiaal is afhankelijk van de dichtheid van het materiaal waardoor het licht doorheen gaat.

Licht verplaatst zich trager in een materiaal dan in vacuüm. De verhouding tussen de twee snelheden is gelijk aan een hoeveelheid gekend als de refractie index (zie Fig.3).

Intermedio (bij Fig.3)

Indien we twee punten A en B, even ver verwijderd van het invalspunt P, projecteren op de scheidingslijn van de twee middens of media, dan bestaat er een vaste verhouding tussen de twee projecties CP en PD. Deze vaste verhouding:

$$n = \frac{CP}{DP}$$

heet brekingsindex van de tweede middenstof t.o.v. de eerste. Voor de overgang van lucht naar water is:

$$n = \frac{CP}{DP} = \frac{4}{3}$$

Voor de overgang van lucht naar glas:

$$n = \frac{3}{2}$$

Een van de wetten (wetten van Snel of Snellius), die de breking beheersen, kunnen we als volgt uitdrukken:

"Aan het grensvlak van twee doorzichtige stoffen wordt een lichtstraal zo gebroken, dat de verhouding van de projecties van gelijke stukken van de invallende en de gebroken straal op het brekende oppervlak steeds constant is".

Dus de snelheid van het licht (v) in het materiaal heeft een refractie of brekingsindex (n) gegeven door

$$v = c / n \text{ of } n = c/v$$

(bij een elektromagnetische golf, HF-golf, stelt "v" de fasesnelheid voor, ook licht is echter een elektromagnetische golf)

Wanneer licht van het ene materiaal door het andere gaat, verandert de frequentie

lumière à l'intérieur des matériaux dans lesquels a lieu la réfraction, comparé à la vitesse de la lumière dans le matériau dans lequel le rayon s'est formé.

Il dépend aussi de la longueur d'onde de la lumière passant dans les deux matériaux ou média.

La vitesse de la lumière dans la matière dépend de la densité de la matière. La lumière se déplace plus lentement dans la matière que dans le vide.

Le rapport entre les deux vitesses est égal à une quantité connue sous la dénomination d'index de réfraction (voir Fig.3).

Remarque (Fig. 3)

Si nous projetons les points A et B, d'une distance égale du point d'attaque P, sur la ligne de séparation des deux média, il existe alors une liaison fixe entre les deux projections CP et PD,

Cette liaison:

$$n = \frac{CP}{DP}$$

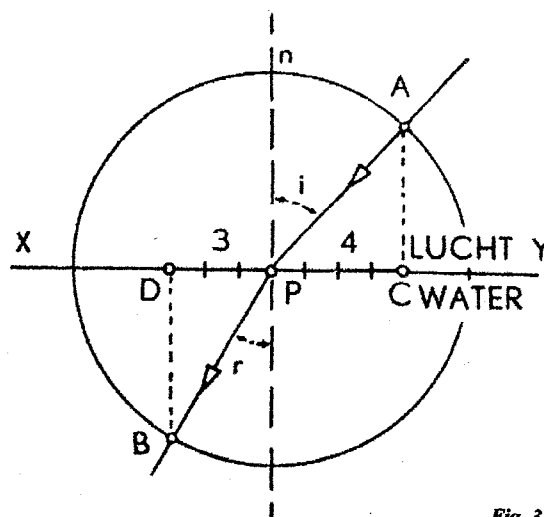
S'appelle index de cassure de la deuxième matière par rapport de la première. Pour le passage de l'air vers l'eau c'est:

$$n = \frac{CP}{DP} = \frac{4}{3}$$

Pour le passage de l'air vers du verre c'est:

$$n = \frac{3}{2}$$

Une des lois (loi de Snel ou Snellius), qui règle les cassures, peut être exprimée ainsi:



"A la frontière de deux matériaux transparents le rayon lumineux est brisée de telle façon à ce que le rapport des projections des parties identiques du rayon entrant et du rayon brisé sur la surface brisée est toujours constante".

Donc la vitesse de la lumière (v) dans le matériaux a un index de réfraction ou de cassure (n) donné par:

$$V=c/n \text{ ou } n=c/v$$

(dans une onde électro magnétique, onde HF, "V" représente la rapidité, la lumière est aussi une onde électromagnétique)

Lorsque la lumière traverse un matériaux à un autre, la fréquence ne change pas,

Fig. 3

niet en dit voor de volgende reden: wanneer licht een wisselwerking (interactie) heeft met materie, absorberen elektronen in het materiaal energie van het licht en ondergaan een trillende beweging met dezelfde frequentie als het licht...

Deze beweging veroorzaakt terug straling van energie met dezelfde frequentie. Daar de lichtsnelheid in een materiaal gelijk is aan de golflengte van het licht (λ) vermenigvuldigt met de frequentie ($v = \lambda \times f$) en wanneer de lichtsnelheid kleiner is dan de snelheid in een vacuüm (c), dan is de golflengte van het licht overeenkomstig vermindert. Dus de golflengte van het licht in een materiaal is kleiner dan de golflengte van hetzelfde licht in een vacuüm.

Stralen die een oppervlakte treffen zoals water en dit onder een vlakke hoek ondervinden geen enkele refractie. Voor elk refractief materiaal bestaat er een hoek die men de **kritische hoek** noemt waarbij totale interne reflectie ontstaat. Dit proces kan belangrijk zijn bij radio communicaties waar signalen, bijvoorbeeld de sporadic E-laag kan treffen en een totale reflectie kan ondergaan. Stralen die een materiaal treffen met hoeken kleiner dan de kritische hoek worden gereflecteerd, terwijl stralen die een materiaal treffen met hoeken groter dan de kritische hoek worden volledig gereflecteerd.

Een idee van totale interne reflectie kan begrepen worden door te kijken wat er gebeurt wanneer licht doorheen een prisma valt (zie Fig.4).

Wanneer licht loodrecht doorheen een van de zijden van het prisma gaat, zal de lichtstraal niet van richting veranderen, maar gaat er zonder afwijking doorheen. Niettemin, wanneer het licht de andere zijde van het prisma bereikt, raakt het de grens tussen lucht en glas en dit bij een hoek van 45° . Voor een glas/lucht grens is de kritische hoek 42° .

Daar de invalshoek bij deze grens groter is dan de kritische hoek, zal al het licht totaal gereflecteerd worden naar de andere zijde van het prisma. Hetzelfde principe doet zich voor wanneer de straal de tweede zijde van het prisma raakt. Daar de straal dus de tweede zijde onder een hoek van 45° raakt, zal er terug totale reflectie ontstaan, dat heeft als gevolg dat het licht hetzelfde oppervlak treft waardat het eerst doorheen was gegaan, maar nu uit een tegengestelde en parallelle richting tevoorschijn komt. (dit betekent niet dat er in het geval van totale reflectie in het tweede medium geen elektromagnetische golf aanwezig is, eerder dat deze laatste snel exponentieel afneemt).

Om te begrijpen hoe radio signalen in de ionosfeer worden gereflecteerd, is het dus nodig een begrip van de radio refractieve index van de ionosfeer te kennen. Sir Edward Appleton is de persoon aan wie de radio refractieve index wordt toegeschreven, hij was verantwoordelijk voor het merendeel van het werk dat leidde tot het berekenen van de radio refractieve index. Dit staat bekend als de Appleton formule. Anderen hebben er toe bijgedragen de naam te veranderen in Appleton-Lassen formule of de Appleton-Hartree formule.

De ionosfeer is meestal samengesteld uit elektronen en ionen. De zwaardere ionen hebben geen invloed op het refractieve karakter van de ionosfeer zoals de elektronen. Om deze reden beschouwen we alleen de elektronen wanneer we de refractieve index van de ionosfeer bekijken.

Zoals we reeds vroeger aangehaald hebben, refracteerd glas lichtstralen, daar glas een grotere dichtheid heeft dan lucht. Zo zullen eveneens lichtstralen in open ruimte refracteren wanneer ze in een dichtere atmosfeer binnendringen. Hetzelfde proces wordt toegepast om radiogolven te refracteren in de ionosfeer. Radiogolven zijn eenvoudig laagfrequent (of lange golflengte) lichtgolven.

Wanneer een radiogolf de ionosfeer binnendringt, zal naarmate de hoogte, de elektronendichtheid snel toenemen, tot een maximum is bereikt van 250 tot 400 km hoogte.

Wanneer de golf dieper doordringt in de ionosfeer zal de stijgende elektronendichtheid oorzaak zijn van het begin van refractie. De graad van refractie welke ontstaat is afhankelijk van de maximum elektronendicht-

et ceci pour la raison suivante: Lorsque la lumière à une inter réaction avec la matière, les électrons dans le matériau absorbent l'énergie de la lumière et subissent un mouvement tremblant sur la même fréquence que la lumière...

Ce mouvement provoque lui même un rayonnement d'énergie avec la même fréquence. Etant donné que la vitesse de la lumière est égale à la longueur d'onde de la lumière (λ) multiplié par la fréquence ($v = \lambda \times f$) et lorsque la vitesse de la lumière est plus petite que la vitesse dans le vide (c), la longueur d'onde est diminué proportionnellement. Donc la longueur d'onde de la lumière dans la matière est plus petite que la longueur d'onde de la même lumière dans le vide.

Les rayons qui atteignent une surface tel que l'eau sous un angle plane ne subissent aucune réfraction. Pour tout matériel réfractif il existe un angle que l'on appelle l'angle critique où survient une réflexion interne totale. Cela peut être important pour la transmission de signaux de radiocommunication, qui touchent par exemple la couche sporadic E, et subissent une réflexion totale. Les rayons qui atteignent la matière sous un angle plus petit que l'angle critique seront réfractés, tandis que les rayons qui touchent la matière sous un angle plus grand sont complètement reflétés.

Une idée de la réflexion interne complète peut se comprendre en regardant ce qui se passe lorsque la lumière traverse un prisme (voir Fig.4).

Lorsque la lumière traverse perpendiculairement un des cotés du prisme, le rayon de lumière ne changera pas de direction, mais le traverse sans dévier. Néanmoins, lorsque la lumière atteint l'autre face du prisme, elle touche la frontière entre l'air et le verre et ceci sous un angle de 45° . Pour une frontière verre/air l'angle critique est de 42° .

Etant donné que l'angle d'attaque à cette frontière est plus grand que l'angle critique, toute la lumière sera réfléchi vers l'autre face du prisme.

Le même principe est valable lorsque le rayon atteint la deuxième face du prisme. Du fait que le rayon atteint la deuxième face sous un angle de 45° , il y aura à nouveau une réflexion totale,

Cela à pour conséquence que la lumière touche la même surface que celle qu'elle a traversée au par-

vent, mais apparaît maintenant dans un sens inverse et parallèle (ceci ne signifie pas, qu'en cas de réflexion totale, qu'il n'y pas ondes électromagnétique dans la deuxième matière mais plutôt que ceux-ci diminuent rapidement exponentiellement.)

Pour comprendre comment les signaux radio sont réfractés dans l'ionosphère, il est donc nécessaire d'avoir des connaissances de l'index réfractif radio de l'ionosphère.

C'est Sir Edward Appleton qui est pour la plus grande partie responsable du travail qui a mené au calcul de l'index radio réfractive.

Ceci est connu comme la formule d'Appleton.

D'autres ont proposé de changer le nom en formule de Appleton-Lassen ou Appleton-Hartree.

L'ionosphère est composé principalement d'électrons et d'ions. Les ions, plus lourds, n'ont pas d'influence sur le caractère réfractif de l'ionosphère comme les électrons. Pour cette raison on considère seulement les électrons lorsque l'on regarde l'index réfractif de l'ionosphère.

Comme nous l'avons expliqué plus avant, le verre réfracte les rayons lumineux du fait que le verre a une plus grande densité que l'air. Ainsi les rayons lumineux se réfracteront dans le vide lorsqu'ils pénètrent dans une atmosphère plus dense. Le même procédé est appliqué pour réfracter les ondes radio dans l'ionosphère. Les ondes radio sont simplement des ondes lumineuses à basse fréquence (ou grande ondes).

Lorsque une onde radio pénètre dans ionosphère et suivant la hauteur, la densité des électrons augmentera rapidement, jusqu'à ce qu'un maximum soit atteint de 250 à 400 km de hauteur.

Lorsque l'onde pénètre plus profondément dans l'ionosphère la densité grandissante des électrons causera le début de la réfraction. Le degré de réfraction dépend de la densité maximum des électrons observée lors-

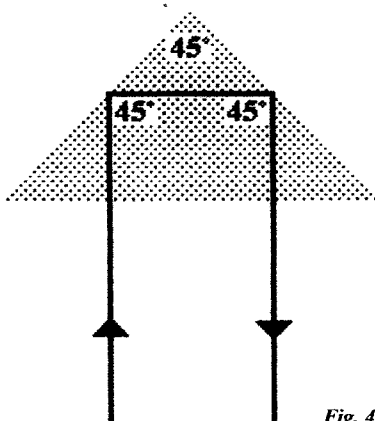


Fig. 4

heid waargenomen wanneer de stralen doorheen de ionosfeer gaan, als ook de frequentie (of golflengte). Lage frequenties (of langere golflengtes) ondervinden een grotere refractie dan golven met een hogere frequentie (of kortere golflengte).

Beschouwen we een signaal van 10MHz opgestraald naar de ionosfeer met een opstraalhoek van 0° . Dit komt overeen met een golf die zich het verst voortplant en naar de horizon is gericht. In dit voorbeeld, zal de golf met de laagste opstraalhoek (0°) de ionosfeer binnendringen waar de elektronendichtheid begint toe te nemen. Wanneer de dichtheid toeneemt, begint de golf teken van refractie te geven. Bij een hoogte van ongeveer 200km, zal de elektronendichtheid sneller beginnen te stijgen en dit overeenkomstig met een ook stijgende refractieve index. Dit veroorzaakt dat de golf sneller afgebogen wordt, totdat het punt bereikt wordt waar reflectie ontstaat. De golf begint nu neerwaarts te gaan waarbij de elektronendichtheid vermindert zodat de golf opnieuw begint te refracteren, deze keer in de richting van de aarde. Als de golf nu verder neerwaarts gaat, zal het refractieniveau verminderen totdat de golf uiteindelijk in de lagere grens van de ionosfeer binnendringt. Op dat punt aangekomen, zal de golf nu gewoon naar beneden gaan tot het de grond bereikt bij een punt dat 34km van het transmissiepunt verwijderd ligt.

Wanneer we nu dezelfde golf onder een hoek van 20° boven de horizon opstralen (dus met een stijgende opstraalhoek), wordt het voor de golf moeilijker naar de aarde terug te keren en dit door het proces van refractie. In dit geval (voorbeeld) zal het signaal toch refracteren maar niet genoeg om terug te keren naar de aarde.

Tot daar het verhaal.

Verdere informatie is uiteraard te vinden in mijn werken: **Propagatie Verschijnselen** en in **Ionogrammen**. Zie eveneens de werken van onze vriend OM Marcel, ON5AU en op zijn prachtige website <http://www.qsl.net/on5au>.

Bron

Aanvankelijke Natuurkunde A.S. D'Hondt en F.J.H. Dirckx
DE PROCEDURE Huidevettersstraat, 161, Brussel
Proplab - Pro (User 's Manual)

ON4APN-Maurits

que les rayons traversent l'ionosphère, et aussi de la fréquence (ou longueur d'onde). Les basses fréquences (ou longues fréquences) ont une plus grande réfraction que les ondes qui ont une haute fréquence (ou une longueur d'onde courte).

Considérons un signal de 10MHz dirigé vers l'ionosphère sous un angle de 0° . Cela correspond à une onde qui se propage au plus loin et est dirigée vers l'horizon. Dans ce cas, l'onde avec l'angle le plus bas (0°) pénétrera l'ionosphère à l'endroit où la densité des électrons commence à augmenter. Lorsque la densité augmente, l'onde commence à présenter des signes de réfraction.

A une hauteur d'environ 200 km, la densité des électrons commencera à augmenter plus rapidement et ceci en correspondance avec une augmentation de l'index de réfraction. Cela a pour conséquence que l'onde s'incurve plus rapidement, jusqu'à ce que l'on atteigne le point de réflexion. L'onde commence alors à descendre avec une diminution de la densité des électrons de façon à ce que l'onde commence à nouveau à réfracter, cette fois dans la direction de la terre. Si l'onde descend encore plus, le niveau de réfraction diminuera jusqu'à ce que l'onde pénètre la frontière basse de l'ionosphère. Arrivé à ce point, l'onde ira normalement vers le bas jusqu'à ce qu'elle atteigne la terre à un point qui se trouve à 34 km du point de transmission.

Lorsque l'on dirige cette même onde avec un angle de 20° au dessus de l'horizon (donc avec un angle montant), cela devient plus difficile pour l'onde de revenir vers la terre à cause du processus de réfraction.

Dans ce cas (exemple) le signal sera quand même réfracté mais pas assez pour être renvoyé vers la terre.

D'autres informations peuvent être obtenue dans mon ouvrage: **Propagatie Verschijnselen** et dans **Ionogrammen**. Voyez également les travaux de notre ami OM Marcel, ON5AU et sur son beau site Web: <http://www.qsl.net/on5au>

Source

Aanvankelijke Natuurkunde A.S. D'Hondt en F.J.H. Dirckx
De procedure, Huidevetterstraat 161, Brussel
Proplab-Pro (User's Manual)

Traduction: Roger-ONL06570+XYL. Vérification: Peter-ON4KNG