Propagation des ondes décamétriques, expérimentations (T.I.P.E. 2014-2015 de Yohan)

T.I.P.E. 2015-2016 de Yohan (propagation des ondes hertziennes par voie inosphérique)

La propagation ionosphérique des ondes hertziennes, dites "ondes radio", est d'une importance vitale car elle seule permet des liaisons radio intercontinentales en cas de conflit ou d'acte terroriste majeur rendant inopérants les satellites et réseaux filaires (les ambassades, les avions loin des centres de contrôle, les sous-marins, les commandos loin de leurs bases y recourent en permanence).

L'étude de ce sujet répond aux exigences du TIPE 2015-2016 :
- on y étudie une structure : celle de la haute atmosphère (zone entre 60 et 800 km d'altitude)
- cette zone a une organisation bien particulière (zones ionisées spécifiques suivant l'altitude, qu'on appelle "couches")
- la complexité tient à ce que l'ionisation est liée au rayonnement solaire, lui-même très fluctuant
- la dynamique provient de ce que l'ionisation est une fonction triplement périodique (ces 3 périodes étant les suivantes : T1 = 24 h pour l'exposition jour/nuit, T2=12 mois pour la hauteur moyenne du soleil sur l'horizon, T3 = 11 ans pour l'activité électromagnétique du soleil en général).

Pour être plus concret, le TIPE traite d'un cas très concret : la détermination des conditions optimum pour établir une liaison radio en situation de catastrophe entre France et USA

<u>Hypothèse de départ</u> :
Une catastrophe (guerre, action terroriste informatique à l'échelle mondiale, etc.) a détruit ou neutralisé les satellites et les câbles sous-marins de télécommunications de l'Atlantique Nord, et a plongé l'Europe de l'Ouest dans une situation comparable à celle du temps de l'occupation (pas de téléphone, émission radio proscrite ou très limitée, brouillages radio systématiques).
La résistance s'organise et on cherche alors à rétablir des liaisons radio clandestines entre la France et les États-Unis par des voies décentralisées et discrètes (émetteurs radio de faible puissance opétés par des particuliers, antennes les moins repérables possible).

<u>Le but de l'étude est de se préparer</u> à gérer une telle situation :
- en étudiant la complexité de la propagation des ondes via l'ionosphère (seule possible dans ce cas)
- en expérimentant comment sont reçus en Amérique du Nord (sur la côte Est, zone la plus proche de l'Europe) les signaux émis depuis la France (émetteur situé en Bretagne) en fonction des principaux facteurs accessibles à l'observation en temps de crise et déterminant l'ionisation de la haute atmosphère terrestre (activité magnétique à la surface du soleil, heure du jour, fréquence)
- en traitant par informatique ces données pour rechercher des corrélations
- en en déduisant de quelle façon on peut avoir la plus forte probabilité d'établir la liaison cherchée

Les moyens à mettre en œuvre pour l'étude sont : un fort recours à internet (données et logiciels ad hoc), des moyens radio soit opérés par Yohan Béclin lui-même (récepteur OC, décodeur morse), soit mis en oeuvre par un opérateur radio autorisé (émetteur morse de la station F6FQX, basée à Quiberon, en Bretagne). .

Plan de l'étude :

1 – Les phénomènes physiques observés :
1 –a - les différents types d'ondes radio par usages
1 –b - les différents modes de propagation des ondes radio, et ce qu'elles propagent
1 –c - l'activité électromagnétique solaire, son impact sur la Terre, rôle du champ géomagnétique
1 –d - la haute atmosphère ou ionosphère, sa structure, sa dynamique
1 –e - la propagation des ondes radio par réfraction et réflexion ionosphériques
1 – f – exemple de bilan électromagnétique d'une liaison radio transatlantique par ondes décamétriques

2 – Les expérimentations correspondantes :
2 –a – Description des expérimentations, matériels, logiciels et observatoires ; captation et émission de signaux, les matériels utilisés
2 –b - Détail des expérimentations
2 –c - But de ces expérimentations
2 –d - Quelles sont les balises qui ont répondu aux appels lors de ces expérimentations?
2 –e - Format des appels de la station émettrice
2 –f – Format des réponses des balises
2 -g – Récapitulation générale des 22 expérimentations

3 - Recherche de corrélation entre activité solaire, géomagnétisme et « ouverture de la bande » :
3 - a - Préambule (méthodologie générale de cette recherche)
3 - b - Calcul théorique du niveau de signal reçu
3 – b - 1- méthode générale de calcul applicable à chacune des expérimentations
3 – b – 2 -- application de cette méthode aux 9 expérimentations retenues
3 – b – 3 calcul théorique du niveau de la MUF
3 – b – 4 – que peut-on dire de l'influence du champ magnétique terrestre ?

4 - Conclusion générale du TIPE

&&&&&&&&&&&&&&&&

1 – Les phénomènes physiques observés :

Résumé du §1 :
Les ondes radio décamétriques (100 m > Θ> 10 m) ont la particularité de pouvoir, dans certaines conditions, utiliser l'ionosphère comme milieu de propagation : par bonds successifs entre sol et ionosphère, elles peuvent assurer des liaisons intercontinentales.
Ce phénomène dépend principalement de l'ionisation de l'ionosphère, liée elle-même à l'activité solaire, donc au rayonnement photonique du soleil et au vent solaire (expulsion de matière par le soleil). Cette activité varie beaucoup dans le temps, et de façon irrégulière.
Le champ magnétique terrestre joue également un rôle dans la propagation des ondes, en particulier parce qu'il canalise dans ses lignes de champ la matière ionisée du vent solaire.
La liaison entre France et USA (côte Est) qui représente 6000 km environ, peut servir d'exemple pour étudier ces phénomènes.

a - les différents types d'ondes radio par usages :

On appelle « ondes radio » (raccourci pour « ondes radioélectriques ») les ondes électromagnétiques

de longueur d'onde comprise entre quelques mm et quelques km et , donc de fréquences comprises entre 30k Hz et 300 GHz. Elles sont utilisées de la façon suivante :
- pour Θ> 10 km : communication avec les sous-marins et observation de phénomènes naturels
- pour 10 km >Θ> 100 m : radiodiffusion dite « AM » (GO : grandes ondes : PO : petites ondes)
- pour 100 m > Θ> 10 m : liaisons transcontinentales, catastrophes, militaire, maritime, aéronautique
- pour 10 m > Θ> 1 m : bande FM, aéronautique, maritime, police, pompiers, SAMU, militaire, météo
- pour 1 m >Θ> 1 mm :Wi-Fi, fours micro-onde, TV par satellite, faisceaux hertziens, radar, GPS

b - <u>les différents modes de propagation des ondes radio, et ce qu'elles propagent</u>
Toutes ces ondes ont des propriétés communes :
- ce sont toutes des ondes électromagnétiques, se propageant dans le vide en ligne droite et à la vitesse de la lumière, susceptibles d'être (suivant le milieu réel autre que le vide dans lequel elles se déplacent et les obstacles qu'elles y rencontrent) réfléchies, réfractées, diffractées, diffusées, absorbées.
- en les modulant par des signaux de fréquence plus basse que la leur (son par exemple), elles permettent de transporter des informations à de très grandes distances, (on dit alors que l'onde radio sert « d'onde porteuse » ou de « porteuse » à l'onde sonore).
Il existe 2 modes principaux de propagation des ondes :
- la propagation guidée, qui utilise un support matériel (guide d'onde, câble coaxial)
- la propagation en espace libre, qui n'a pas besoin d'un support matériel (entre 2 talkies-walkies)
Le premier mode ne permet que des liaisons à courte portée à cause des pertes dans le support matériel qui sont exponentielles avec la distance.
Le second mode permet es liaisons à très grande portée, les pertes ne croissant qu'avec le carré de la distance. La sonde Voyager 1, partie en 1977, est actuellement à 19 milliards de km de la Terre et nous recevons encore ses signaux...

<u>c - l'activité électromagnétique solaire, son impact sur la Terre, rôle du champ géomagnétique</u>
Le Soleil, depuis sa surface, émet des photons de toutes fréquences (des ondes radio aux rayons cosmiques) mais, globalement, la majeure partie de l'énergie photonique solaire atteignant l'atmosphère terrestre est située dans le spectre visible, l'infra-rouge et l'ultra-violet.

Plus précisément, exprimé en énergie :

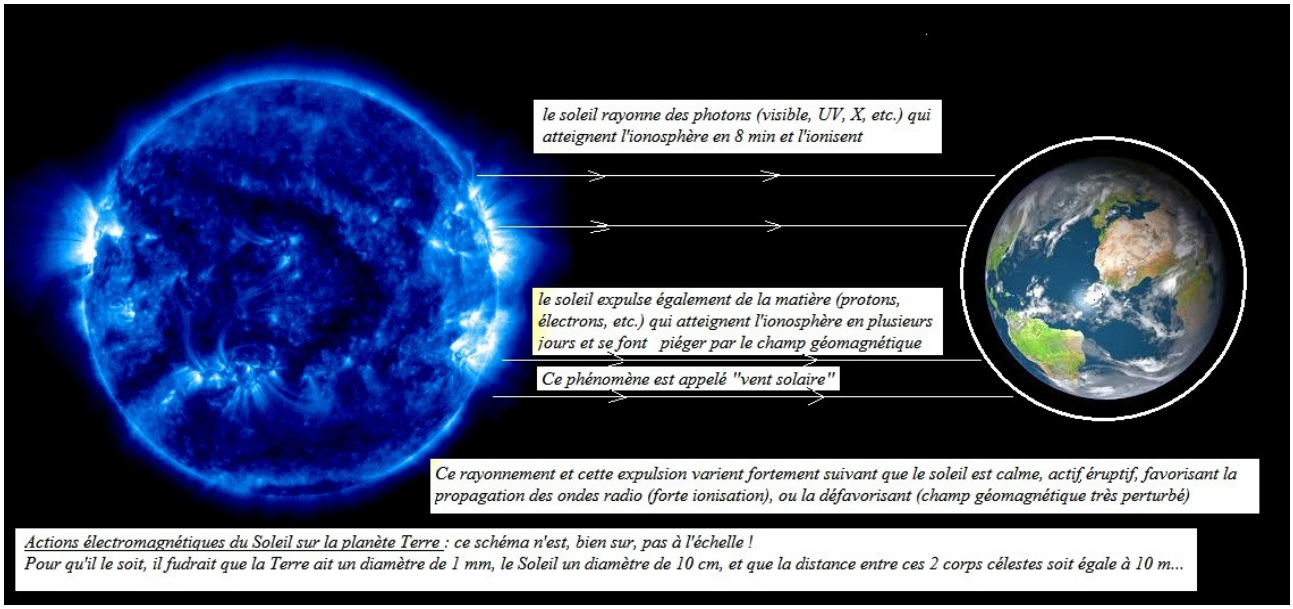
- "ce qui arrive en haut de l'atmosphère", c'est :

Répartition (%)	Longueur d'onde	Lumière
9	$\lambda < 400$ nm	Ultraviolet
47	$400 < \lambda < 800$ (nm)	visible
44	$800 < \lambda < 3.000$ (nm)	Infrarouge proche

- "ce qui arrive en bas de l'atmosphère", c'est :

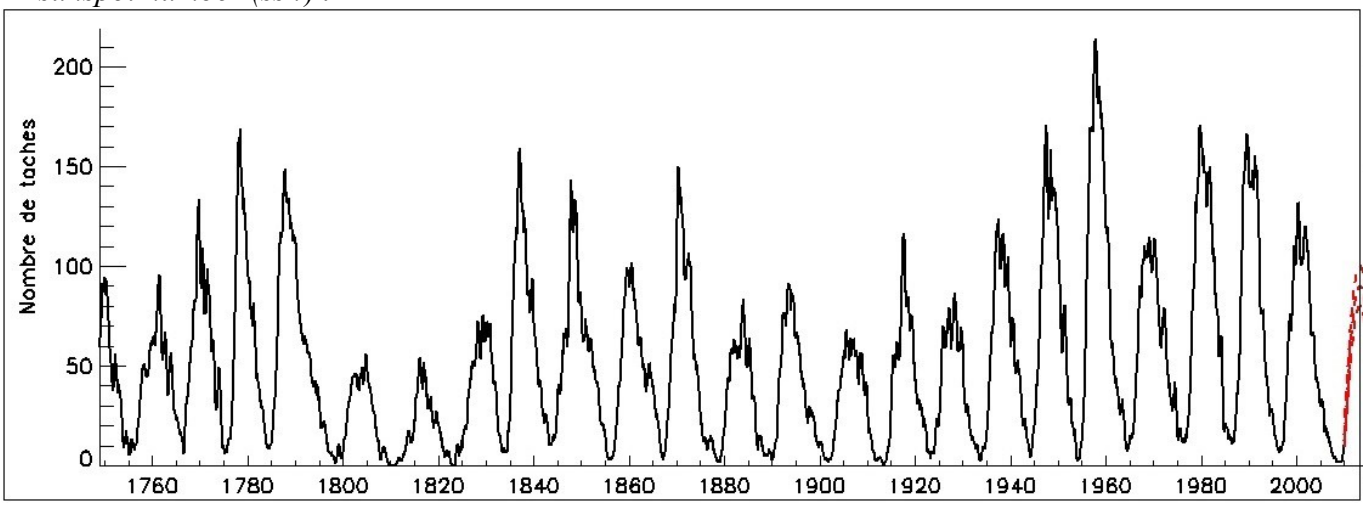
Répartition (%)	Longueur d'onde	Lumière
0,25	$280 < \lambda < 315$ (nm)	UV moyen
4,75	$315 < \lambda < 400$ (nm)	UV proche
44	400 < < 800 (nm)	visible
51	$800 < \lambda < 2.350$ (nm)	Infrarouge

On constate donc que ce sont surtout les UV qui interagissent avec les atomes des gaz atmosphériques en les ionisant par arrachage d'électrons de leurs couches externes.
Mais outre ce rayonnement photonique, le soleil expulse de la matière (1 million de tonnes/s) à très grande vitesse (1,6 million de km/h en moyenne) ; c'est ce qu'on appelle "le vent solaire" qui est en fait un flux de plasma (H^+, He^{++}, e^-).
Les particules du vent solaire sont piégées dans le champ magnétique terrestre, provoquant les aurores boréales et australes à proximité des pôles. Les rafales de vent solaire provoquées par des éruptions solaires (ou tempêtes solaires) sont particulièrement énergétiques (1000 fois plus que par « soleil calme »). Elles interagissent avec le champ magnétique terrestre : on parle alors d'activité géomagnétique, dont les fluctuations, dues en particulier au vent solaire, peuvent bouleverser les conditions de propagation des ondes radio :
- en élevant le niveau de bruit de fond (ce qui noie le signal jusqu'à le rendre inaudible)
- en destructurant le signal (phénomène comparable au brouillage, qui rend le signal inintelligible)
- en modifiant l'ionosphère au point qu'elle ne rabat plus certaines fréquences vers le sol



d - <u>la haute atmosphère ou ionosphère, sa structure, sa dynamique</u>
Au fur et à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, la pression diminue (100000 Pa au niveau de la mer ; 0,1 Pa à 60 km d'altitude). Ceci signifie qu'en haute atmosphère, quand un électron a été arraché par un photon solaire à un atome (par exemple d'oxygène ou d'azote), l'ion et l'électron résultants parcourront une distance assez longue et, donc, mettront un temps assez long avant de se recombiner avec d'autres pour donner un nouvel atome neutre : donc l'ionisation sera d'autant plus forte et d'autant plus durable qu'on se situera haut dans l'atmosphère.
Globalement, en matière d'ionisation, on constate que :
- en dessous de km environ, il n'y a pratiquement pas d'ionisation, hors phénomènes très ponctuels comme orages et feux de Saint-Elme. On appelle "ionosphère" l'atmosphère au-dessus de 60km.
- dans la partie basse de l'ionosphère, l'ionisation suit directement l'ensoleillement : apparition avec le lever du soleil, maximum quand le soleil est au zénith, disparition au coucher du soleil
- dans la partie haute de l'ionosphère (200 à 800 km), l'ionisation varie aussi avec l'ensoleillement mais moins directement et plus lentement ; en particulier elle reste importante la nuit
- outre ce rythme circadien (de 24 heures environ), on assiste à un rythme annuel (en été, le soleil est plus haut sur l'horizon et brille plus longtemps chaque jour, ce qui accroît l'ionisation par rapport

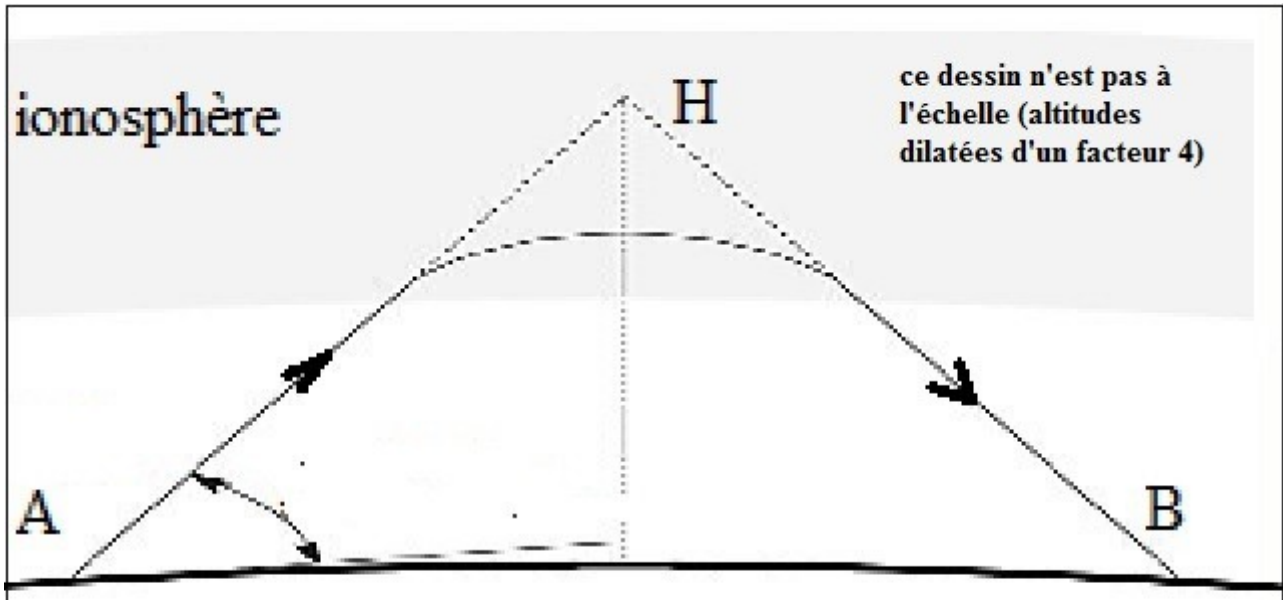
à l'hiver)
- enfin l'activité générale du soleil respecte une période de 11 ans environ ; ce phénomène est observé depuis plusieurs siècles ; l'ionisation de la haute atmosphère suit donc le même rythme. Il est intéressant de noter cette activité solaire est observée (depuis 260 ans!) à travers le nombre de taches sombres[1] à la surface du soleil : l'indicateur correspondant R est appelé *nombre de Wolf* ou *sunspot number (ssn)* :



à l'échelle, le diamètre de la la Terre serait de 1 mm

e - <u>la propagation des ondes radio par réfraction et réflexion ionosphériques</u>
Dans cette étude, nous nous intéressons à la catégorie des ondes dites « décamétriques » (100 m > Θ > 10 m) qui ont seules la particularité de permettre des liaisons transcontinentales avec des puissances assez faibles (quelques Watts à quelques kW), donc avec des installations peu coûteuses. Elles réalisent cette prouesse en se propageant par rebonds successifs entre le sol et l'ionosphère (haute atmosphère, dans laquelle les gaz sont ionisés sous l'action des photons solaires). Bien qu'il s'agisse d'une réfraction qui incurve la trajectoire de l'onde, tout se passe comme si il y avait réflexion sur une «sorte de miroir » et renvoi de l'onde vers le sol.

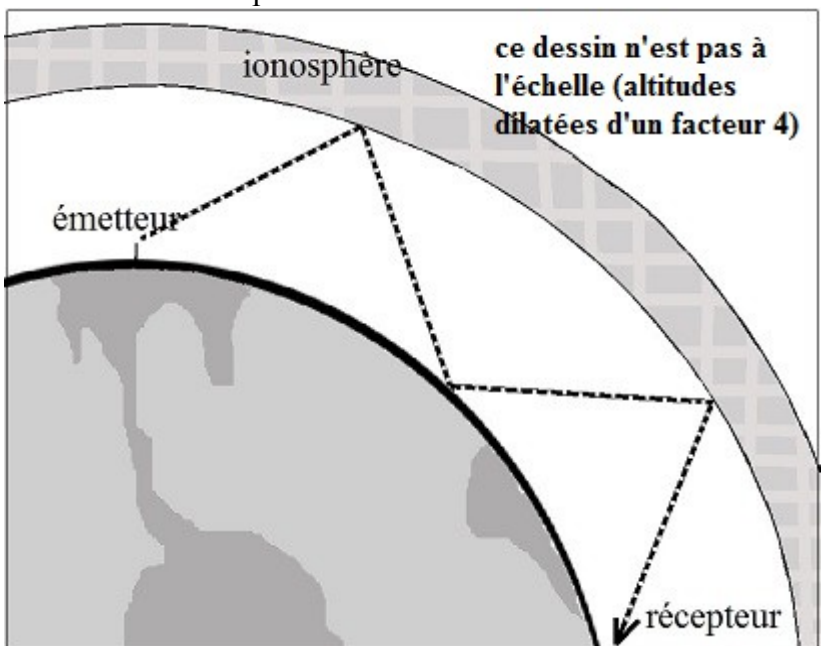
1 Ces taches sont des zones de température inférieure à la température moyenne et correspondent à des augmentations locales du champ magnétique : le diamètre d'une tache peut atteindre plusieurs fois celui de la Terre.



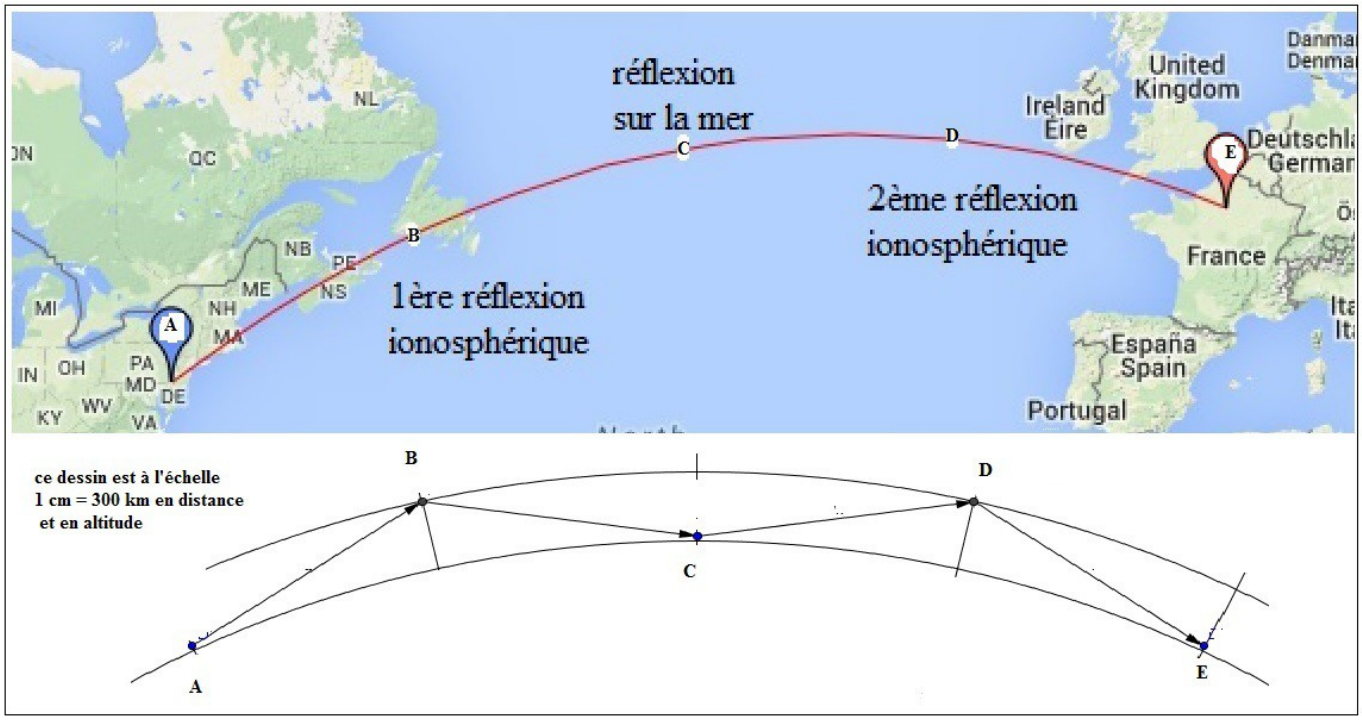
Pour aller d'un point A au sol à un point B au sol, A et B n'étant pas en vue l'un de l'autre du fait de la courbure de la terre, l'onde suit un parcours incurvé dans le plasma ionosphérique. La partie initiale et la partie finale du trajet de l'onde étant rectilignes, tout se passe comme si l'onde était téfléchie par l'ionosphère en un point H situé plus en altitude que le point le plus haut de sa trajectoire réelle. On parle alors de réflexion ionosphérique alors qu'il s'agit en fait d'une succession de réfractions.

Ces "miroirs" sont appelés couches (du bas vers le haut : couches D, E, F1, F2) ayant les propriétés suivantes :
- la couche D absorbe beaucoup les ondes décamétriques. Elle apparaît à l'aube et disparaît la nuit. .
- la couche E est un excellent réflecteur, mais instable et erratique.
- les couches F1 et F2, fusionnant en couche F la nuit, sont d'excellents réflecteurs. Elles permettent la réflexion des ondes, la nuit comme le jour.

En rebondissant à nouveau sur le sol, par bonds successifs, une onde peut parcourir des milliers de km (par exemple, en 2 bonds de 3000 km ou 3 bonds de 2000 km, une liaison entre France et USA d'environ 6000 km peut être établie.



f – <u>exemple de bilan électromagnétique d'une liaison radio transatlantique par ondes décamétriques</u> :
A titre d'exemple, on se propose, dans ce paragraphe, d'étudier une liaison radio entre les USA (région de New York) et la France (6000 km environ, en 2 bonds de 3000 km chacun), à un moment du cycle solaire où l'activité solaire est moyenne, dans 2 cas extrêmes en matière d'ionosphère :
- <u>cas n°1</u> : 0h T.U.[2] à mi-parcours , 21h à New York, 3h à Paris (absorption ionosphérique minimale)
- <u>cas n°2</u> : 12h T.U.[3] à mi-parcours , 9h à New York, 15h à Paris (absorption ionosphérique maximale)



Dans les 2 cas, l'onde part du sol à New York (point A sur le schéma ci-dessus) et monte jusque dans l'ionosphère où elle se réfléchit à 400 km d'altitude au-dessus de Terre Neuve (point B) ; elle redescend jusqu'au niveau de la mer (point C) où elle se réfléchit à mi-parcours, puis elle remonte vers l'ionosphère où elle se réfléchit à 400 km d'altitude un peu à l'ouest de l'Irlande (point D) puis redescend vers Paris (point E) où elle arrive après un parcours total de 6000 km mesurés au sol le long de l'orthodromie (6360 km de parcours réel compte tenu des allers et retour entre « terre et ciel »).

Le bilan électromagnétique de la liaison, qu'on suppose sur 14 MHz, c'est-à-dire le rapport
P_R / P_E = « Puissance reçue à Paris »/ »Puissance émise à New York»
s'exprime en prenant en compte successivement les facteurs suivantes ;
- le gain[4] de l'antenne d'émission : on suppose qu'il s'agit d'une antenne directive de (+9 dB)
- le perte de l'antenne de réception : on suppose qu'il s'agit d'une « mauvaise »[5]antenne de (- 2 dB)
- l'affaiblissement par diffusion spatiale (répartition de l'énergie sur des demi-sphères de rayons

2 T.U. = temps unversel
3 T.U. = temps unversel
4 Par rapport à une antenne isotrope
5 Antenne clandestine telle qu'un fil entre 2 arbres ou dans une maison

croissants à partir de l'antenne d'émission), qui introduit un facteur[6] $k = [\Theta/(2\pi d)]^2 = [20/(2\pi 6360000)]^2 = 2{,}5.10^{-13}$ ce qui correspond à (-126 dB)
- la perte par réflexion sur la mer à mi-parcours : on la suppose de 1 dB (milieu très bon conducteur)
- la perte par absorption ionosphérique : on suppose 2x5= 10 dB dans n°1, 2x20 = 40 dB dans le cas n°2

D'où, en récapitulant, le bilan résultant exprimé en dB :
- cas n°1 : 9 – 2 – 126 – 1 – 10 = - 130 dB
- cas n°2 : 9 – 2 – 126 – 1 – 40 = - 160 dB

D'où la puissance reçue à Paris en supposant que l'émetteur de New York a 100 Watts de puissance :
- cas n°1 : PR = 100 x 10^{-13} = 10^{-11} W = 10 pW
- cas n°2 : PR = 100 x 10^{-16} = 10^{-14} W = 0,01 pW

A noter que la puissance du cas n°1 est de celles qu'un bon récepteur de trafic peut recevoir sans difficulté si le bruit de fond n'est pas trop élevé, mais qu'en revanche celle du cas n°2 permet très rarement la réception car le bruit est généralement supérieur à ce niveau.

2 – Les expérimentations correspondantes :

a – Description des expérimentations, matériels, logiciels et observatoires, captation et émission de signaux, les matériels utilisés

On procède à une série de 22 expériences identiques réparties sur 2 mois (juillet et août) :
- émission de puis la France de signaux (ondes décamétriques) vers l'Amérique du Nord
- réception (ou non-réception) en Amérique du Nord de ces signaux émis depuis la France

Pour chacune de ces expériences, on mesure ou relève, dans toute la mesure du possible :
- le niveau du signal reçu et le niveau du bruit de fond (ou le rapport signal/bruit)
- le gain des antennes, la puissance de l'émetteur
- l'activité solaire (nombre de Wolf ou de taches à la surface du soleil, flux, tempêtes ou éruptions)
- l'activité géomagnétique (indices, aurores boréales éventuelles)
- la MUF (*maximal usable frequency*) indiquée par la sonde ionosphérique de Dourbes (Belgique)
- la hauteur virtuelle de réflexion des ondes ionosphériques (même source)
- les observations de plusieurs observatoires dans le monde (Boulder-USA, Sydney-Australie, Scheggerott-Allemagne, satelitte SOHO)
- les probabilités de propagation données par les modèles (VOACAP[7])

Ces mesures et ces relèves sont figurées dans le tableau de la page suivante.

Ensuite, on se livre à une recherche de corrélation entre, d'une part activité solaire et activité géomagnétique, d'autre part faisabilité constatée de la liaison radio entre France et Amérique du Nord.

6 Avec Θ= longueur d'onde et d = distance parcourue par l'onde (Boithias, page 8, bibli. n°1)
7 : Voice of America Propagation Analysis Program

Tableau des expérimentations

	Observation effectuée Grandeur mesurée	Objectif recherché	Outils utilisés
1	Émission UV de la couronne solaire	Visualiser les émissions de photons ultraviolets de la couronne solaire	Solar and Heliospheric Observatory EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html
2	Flux et taches solaires Index de Wolf, champ magnétique terrestre	Connaître composantes champ géomagn. et autres données (flux, index, index K, etc.)	D K Ø W C Y, Scheggerott, südöstlich von Flensburg balise aurores polaires http://dk0wcy.de/magnetogram/
3	Vent et activité solaires acitité géomagnétique, aurores polaires	Visualiser l'activité solaire en différentes longueurs d'onde et autres observations	http://www.swpc.noaa.gov/ Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, Colorado, USA
4	Etat ionisation de l'ionosphère	Connaître en temps réel l'état de l'ionosphère, la MUF (maximum usable frequency), etc.	sonde ionosphérique de Dourbes, Belgique http://website.informer.com/visit?domain=digisonde.oma.be http://digisonde.oma.be/latestFrames.htm
5	Champ géomagnétique, aurores australes	Connaître champ géomagn. et aurores polaires australes	Australian Space Weather Services http://www.ips.gov.au/
6	Probabilité liaison radio France Amérique du Nord	Calculer probabilité d'une liaison radio France-USA (temps réel)	VOACAP, logoiciel de *Voice of America* http://www.voacap.com/prediction.html
7	Écoute et mesure aux USA de signaux émis de France	Mesurer le niveau de réception en Amérique du Nord d'un signal émis de France	reverse beacon networks (Réseau Mondial des Rétrobalises) http://www.reversebeacon.net/index.php http://www.reversebeacon.net/dxsd1/dxsd1.php?f=0&c=F6FQX&t=dx
8	Écoute et mesure en France de signaux émis des USA	Mesurer le niveau de réception en France d'un signal émis des USA	Station F6QQX et web sdr de l'université de Twente, NL http://websdr.ewi.utwente.nl:8901/ ;

2-b- Détail des expérimentations :

Elles sont au nombre de 22 réalisées du 3/7 au 9/8/2015. Chacune est effectuée suivant le protocole suivant qui comprend 6 étapes:

- 3 signaux radio de 60 à 90 secondes chacun sont émis par la station française F6FQX basée à Quiberon, en Bretagne (latitude 47,483° Nord ; longitude longitude 3,117° Ouest) en direction de l'Amérique du Nord (azimut Nord-Oust) sur 3 bandes d'ondes courtes décamétriques (bande des 20 m ou 14 MHz ; bande des 17 m ou 18 MHz ; bande des 15 m ou 21 MHz).
- ces signaux visent à provoquer une réaction de la quinzaine de rétro-balises de cette partie du

continent nord-américain, réaction qui consiste, pour la balise à confirmer ou non qu'elle a reçu le signal[8] en précisant à quelle heure, sur quelle fréquence exactement, et avec quel niveau (en dB s/n). Ce rapport de la balise est mis en temps réel sur un site internet consultable immédiatement.
- ces 2 premières étapes étant faites, la 3ème va consister, immédiatement à écouter si des stations sont audibles et quel est le niveau de bruit sur chacune des 3 bandes.
- la 4ème étape va consister à aller immédiatement chercher des informations auprès d'observatoires de l'état du Soleil, de l'ionosphère et du champ magnétique terrestre :
- l'observatoire de Boulder, Colorado (USA)
- l'observatoire de Sydney (Australie)
- la station magnéto-métrique de DK0WCY, Scheggerott (Allemagne)
- la sonde ionosphérique de Dourbes (Belique)
- le satellite SOHO, placé entre le Soleil et la Terre (1er point de Lagrange)
- la 5ème étape consiste à mettre en œuvre le logiciel de prévision de propagation de VOACAP
- la 6ème étape consiste à récapituler ces données pour en tirer une première synthèse de cohérence
L'ensemble de ces étapes représente environ 2 heures par expérimentation.

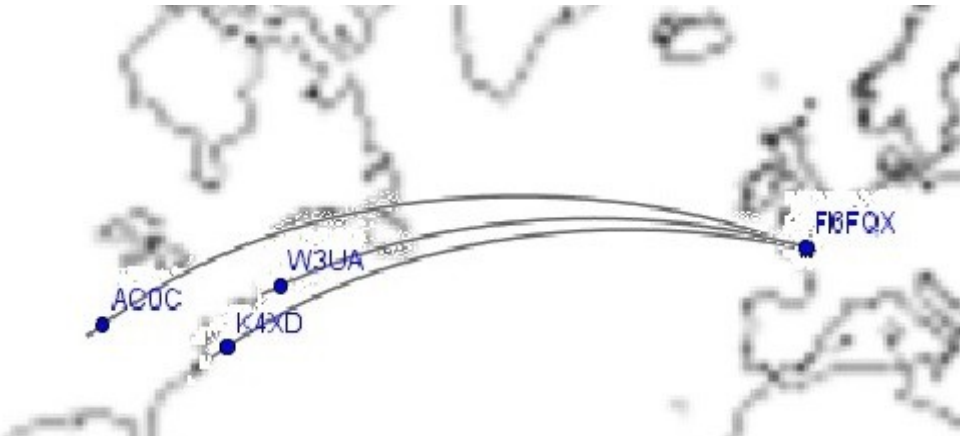
2 – c - But de ces expérimentations :
Il est de comparer en temps réel si des données relatives aux paramètres solaires et terrestres et la qualité de réception en Amérique du Nord d'un signal radio émis de France sont conformes aux théories.

2 – d - Quelles sont les balises qui ont répondu aux appels lors de ces expérimentations :
La bande des 20 m (14 MHz) est, de loin, la plus fiable (39 réponses de balises contre respectivement 8 et 6 pour les 2 autres bandes). Nous concentrerons donc notre attention sur cette bande. Ses balises qui ont répondu au total 39 fois aux appels sont au nombre de 15. Les voici, avec leur indicatif, leur opérateur, son adresse, ses coordonnées géographiques, la distance à laquelle elle est située de l'émetteur, l'azimut du trajet de l'onde partie de France :

indicatif	opérateur radio	ville	Etat	latitude (°)	longitude (°)	azimut (°)	distance (km)
AA4VV	Berry Thomas	Lexington	Caroline du Nord	35,82	80,26	288	6270
AC0C	Blaine Jeffrey	Louisburg	Kansas	38,62	94,68	299	7060
K1TTT	Robbins David	Peru	Massachussets	42,44	73,05	291	5340
K2NNY	Hicory Lake Club	Fairport	New York state	43,1	77,44	294	5600
K4XD	Archer Rowland	Wake Forest	Caroline du Nord	35,94	78,52	287	6130
K8ND	Maass Jeffrey	Powell	Ohio	40,16	83,07	294	6170
N2QT	Sihlanick Mark	Forest	Virginie	37,37	79,27	289	6090
N3AM	Siva John	Silver Spring	Maryland	39	77,3	290	5850
N4ZR	Smith Peter	Kearneysville	West Virginia	39,39	77,9	291	5860
NN3RP	Pena Rafael	Washington	Washington DC	38,9	77,04	290	5840
VE2WU	Marten Guthrie	Franklin	Canada (Québec)	45,03	73,92	295	5250
W3UA	Shablygin Gene	Bedford	New Hampshire	42,95	71,52	291	5200
W4KKN	Kowalski Mike	Nokesville	Virginie	38,7	77,57	290	5890
W8WWV	Ordy Gregory	Chesterland	Ohio	41,52	81,34	295	5970
WZ7I	Cosand Wesley	Pipersville	Pennsylvanie	40,43	75,14	290	5610
			moyenne	39,96	78,53	290	5880

8 Dire que la balise a reçu le signal signifie plusieurs choses :
- elle a clairement identifié les 5 caractères constituant l'indicatif (F6FQX) de l'émetteur
- elle a clairement lu la totalité de son message et la modulation utilisée, ici cw = continuous wave (un type de morse)
- elle a mesuré sa fréquence à 100 Hz près et sa vitesse de transmission (exemple : 26 wpm, i.e. 26 words per minute)
- elle a mesuré le niveau du signal reçu (par exemple, 17 dB s/n , i.e. 17 dB signal/noise)

On peut noter, vu depuis l'émetteur en France, leur grande similitude :
- distance comprise entre 5200 et 7060 km
- azimut compris entre 287 et 299° (obtenu par calcul de trigonométrie sphérique)
Similitude qui existe aussi du point de vue « radio », comme on le verra plus loin dans l'étude.
A noter toutefois que la balise AC0C est un peu à l'écart des autres (Kansas). La figure ci-dessous représente 3 orthodromies parmi les 15 de toutes les liaisons :
- celle de AC0C (Kansas) a l'azimut le plus au Nord et la distance la plus longue
- celle de K4XD (Caroline du Nord) a l'azimut le plus au Sud
- celle de W3UA (New Hampshire) a la distance la plus courte



2 – e - Format des appels de la station émettrice :
Ils sont faits en morse à la vitesse de 25 mots par minute environ, suivant le règlement et la langue morse d'usage international sur ces bandes. Leur format est le suivant :
CQ CQ CQ DE F6FQX F6FQX F6FQX
répété 3 fois (CQ signifiant « appel général » et F6FQX étant l'indicatif de la station appelante).
Les balises sont conçues pour ne réagir qu'à des appels de ce format.

2 – f - Format des réponses des balises :
Il se présente sous forme d'un tableau du type de celui de l'expérimentation n°17 ci-dessous :

n°	beacon	dx	freq	cq/dx	snr	speed	time
1	EA5WU	F6FQX	18074.0	CW CQ	21 dB	25 wpm	0146z 04 Aug
2	F5RRS	F6FQX	14052.3	CW CQ	10 dB	26 wpm	0144z 04 Aug
3	NN3RP	F6FQX	14052.1	CW CQ	5 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
4	K8ND	F6FQX	14052.2	CW CQ	4 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
5	K1TTT	F6FQX	14052.2	CW CQ	4 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
6	DL1EMY	F6FQX	14052.2	CW CQ	10 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
7	NA3M	F6FQX	14052.2	CW CQ	6 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
8	N2QT	F6FQX	14052.2	CW CQ	7 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
9	W8WWV	F6FQX	14052.2	CW CQ	14 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
10	EA5WU	F6FQX	14052.2	CW CQ	15 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
11	W3UA	F6FQX	14052.2	CW CQ	14 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
12	K4XD	F6FQX	14052.2	CW CQ	8 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
13	GW8IZR	F6FQX	14052.2	CW CQ	14 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
14	AC0C	F6FQX	14052.2	CW CQ	9 dB	26 wpm	0143z 04 Aug
15	W4KKN	F6FQX	14052.2	CW CQ	14 dB	26 wpm	0143z 04 Aug

On note que des balises autres qu'américaines ont aussi répondu : la n°1 et la n°10 en Espagne, la 2 en France, la 6 en Allemagne, la 13 au Pays de Galles. La colonne snr (*signal on noise report*) donne le niveau du signal reçu par la balise exprimé par rapport à son seuil de sensibilité (bruit).

2 -g – Récapitulation générale des 22 expérimentations

Récapitulation des 22 expérimentations											
exp.			rétro-balises	rétro-balises	rétro-balises	SOHO	USA	USA	Belgique	Belgique	Australie
n°	jour	TU	14 MHz	18 MHz	21 MHz		Boulder (K)	Boluder (A)	MUF (MHz)	alt réfl. Km	comment.
1	03/07/15	9	4 (moy. 16 dB)	1 (moy. 16 dB)	0	erupt.	3	3	20	500	
2	06/07/15	8	0	0	0	erupt.	4	25	17	250	dépress.
3	07/07/15	11	0	0	0	erupt.	1	10	19	250	dépress.
4	08/08/15	16	2 (moy. 9,5dB)	2 (moy. 13 dB)	0	erupt.	1	5	21	300	normal
5	09/07/15	3	7 (moy. 12 dB)	0	0	erupt.	1	5	16	350	normal
6	12/07/15	17	0	1 (moy. 6 dB)	0	erupt.	2	5	21	275	normal
7	13/07/15	15	1 (moy. 9 dB)	0	0	erupt.	5	11	17	250	depress.
8	15/07/15	11	1 (moy. 15 dB)	0	0	quiet	1	7	21	200	depress.
9	19/07/15	2	1 (moy. 14 dB)	0	0	quiet	1	5	19	300	depr. 20 %
10	20/07/15	3	1 (moy. 8 dB)	1 (moy. 10 dB)	0	erupt.	1	3	14	300	depr. 30 %
11	21/07/15	2	4 (moy.12 dB)	0	0	erupt.	2	3	13	300	depr. 30 %
12	25/07/15	0	2 (moy. 7 dB)	3 (moy. 16 dB)	2 (moy. 14 dB)	quiet	2	10	15	340	aurore poss.
13	27/07/15	9	0	0	0	quiet	3	8	13	425	très faible act
14	28/07/15	5	0	0	0	quiet	2	11	16	500	normal to fair
15	28/07/15	12	0	0	0	quiet	2	11	21	240	depress.
16	01/08/15	2	5 (moy. 13 dB)	0	0	erupt.	3	12	12	525	storm warn.
17	04/08/15	5	10 (moy. 9 dB)	0	0	quiet	2	11	13	340	depress.
18	04/08/15	20	1 (moy.11 dB)	0	4 (moy. 17 dB)	storm	1	6	23	500	depress.
19	06/08/15	16	0	0	0	storm	1	6	23	450	degraded
20	07/08/15	8	0	0	0	storm	2	11	no	no	normal
21	07/08/15	19	0	0	0	eruptive	4	11	27	250	normal
22	09/08/15	5	0	0	0	eruptive	2	12	10	350	normal
			Total = 39	Total = 8	Total = 6						
			Moy. 11 dB	Moy. = 13 dB	Moy. = 13 dB		Moy. = 2,1	Moy. = 8,7	Moy. = 16,9	Moy. = 343	

suite

exp.		Allemagne		Allemagne	Allemagne	Allemagne	Allemagne	Allemagne	VOACAP	VOACAP	VOACAP
n°	jour	A	K	sunspot	flux	aurore bor.	act. Sol.	act. géom.	proba. 14 MHz	proba. 18 MHz	proba. 21 MHz
1	03/07/15	6	2	73	114	no	erupt	quiet	60%	0%	0%
2	06/07/15	3	3	131	125	no	erupt.	quiet	5%	0%	0%
3	07/07/15	13	2	109	133	no	erupt.	quiet	17%	17%	0%
4	08/08/15	11	2	109	133	no	erupt.	quiet	1%	40%	25%
5	09/07/15	8	2	118	133	no	erupt.	quiet	66%	0%	0%
6	12/07/15	8	4	91	12	no	erupt.	active	29%	0%	0%
7	13/07/15	17	4	59	116	no	erupt	quiet	-%	-%	-%
8	15/07/15	-	3	39	105	no	quiet	quiet	36%	6%	3%
9	19/07/15	6	2	40	97	no	quiet	quiet	68%	0%	0%
10	20/07/15	9	3	46	99	no	erupt	active	24%	0%	0%
11	21/07/15	10	2 à 3	46	99	no	erupt	active	57%	0%	0%
12	25/07/15	23	3	27	89	no	quiet	active	42%	32%	0%
13	27/07/15	11	3 à 4	38	91	no	quiet	quiet	-%	-%	-%
14	28/07/15	14	3	53	100	no	quiet	quiet	2%	0%	0%
15	28/07/15	14	3 à 4	53	100	no	quiet	quiet	19%	37%	3%
16	01/08/15	19	3	83	102	no	quiet	minor storm	9%	0%	0%
17	04/08/15	10	2	51	102	no	quiet	quiet	4%	0%	0%
18	04/08/15	10	3 à 4	62	106	no	quiet	minor storm	67%	49%	1%
19	06/08/15	9	4	62	106	no	erupt.	minor storm	50%	34%	0%
20	07/08/15	14	2 à 4	80	122	no	erupt	minor storm	0%	0%	0%
21	07/08/15	14		80	122	no	erupt	minor storm	64%	35%	0%
22	09/08/15	15	2	92	121	no	erupt	quiet	0%	0%	0%
		oy. = 24,4		Moy. = 70	Moy. = 106				31,00%	12,50%	1,60%

3 - Recherche de corrélation entre activité solaire, géomagnétisme et « ouverture de la bande »

3 – a - Préambule (méthodologie générale de cette recherche) :

Dans ce qui suit, par convention de langage, on dira qu'à un moment donné :
- une bande est « ouverte » si un signal émis de France à cet instant sur cette bande de fréquences

(ou de longueurs d'onde) est reçu par des balises en Amérique du Nord
- une bande est « fermée» si un signal émis de France à cet instant sur cette bande de fréquences (ou de longueurs d'onde) n'est pas reçu par des balises en Amérique du Nord

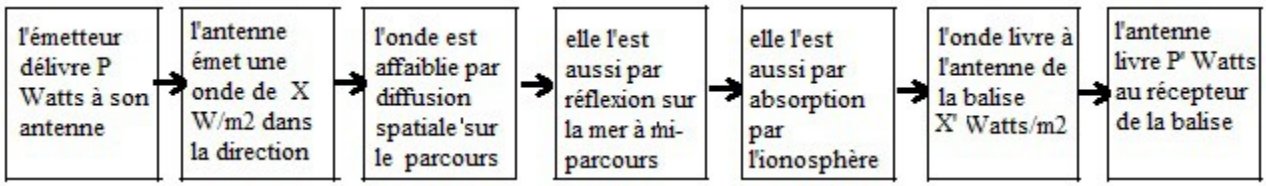
On va concentrer l'étude sur un nombre limité de situations en justifiant les raisons de ce tri :
- on s'intéresse à la seule bande 14 MHz, les 2 autres étant beaucoup trop rarement ouvertes (donc trop peu fiables a priori).
- sur le thème « pourquoi la bande est-elle ouverte dans cette expérimentation ? », on va s'intéresser à celles des expérimentations pour lesquelles plus de 2 balises ont répondu (celles n°1, 5, 11, 16 et 17), les autres cas pouvant être considérés comme des cas de bande « insuffisamment ouverte »
- sur le thème « pourquoi la bande n'est-elle pas ouverte dans cette expérimentation ? », on constate que 9 fois sur 10, aucune des 3 bandes n'est ouverte : on va donc éliminer le dixième cas (expérimentation n°6) trop atypique ; parmi les 9 restants, on va éliminer les expérimentations pour lesquelles le parcours est « trop dans le jour », et où l'absorption due à l'ionisation intense est vraisemblablement l'explication ; en revanche, 2 expérimentations (les n° 14 et 22) se passent à 5 h TU, heure à laquelle la bande est très souvent ouverte : on va donc se concentrer sur ces 2 expérimentations, à situation « inattendue »

Cela nous fait donc au total 7 expérimentations (une sur 3 environ) que nous allons étudier plus en détail en nous posant chaque fois les 2 questions suivantes, en partant des données alors observées :
- un calcul théorique du niveau de signal reçu conduit-il à la même conclusion que ce qu'on observe lors de l'expérimentation ? (en d'autres termes, ce calcul permet-il la prévision d'ouverture ou non?)
- un calcul théorique du niveau de la MUF[9] conduit-il à la même conclusion que ce qu'on observe lors de l'expérimentation ? (en d'autres termes, ce calcul permet-il la prévision d'ouverture ou non?)
La synthèse des réponses à ces questions contribuera à valider ou non le modèle de prévision de propagation des ondes radio entre France et Amérique du Nord envisagé.

3 – b - Calcul théorique du niveau de signal reçu :

Nous étudierons successivement :
- une méthode générale de calcul applicable à chacune des expérimentations (§ 2-a)
- l'application de cette méthode aux 7 expérimentations retenues (§ 2-b)

3 – b - 1- méthode générale de calcul applicable à chacune des expérimentations :
Le bilan énergétique d'une liaison correspond au schéma suivant :

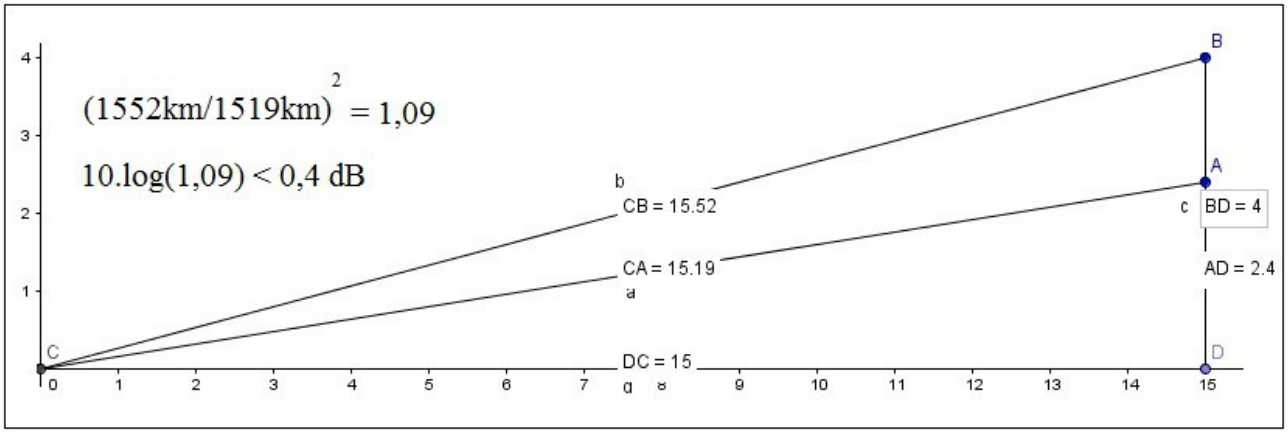


La puissance P vaut 100 W. L'antenne d'émission (dipôle demi-onde horizontal mal dégagé (pour raisons de camouflage...) a un gain de -3 dB (soit un facteur d'amplification de $10^{-0,3} = 0,5$) dans la direction N-W ; elle rayonne donc, dans cette direction, sur la demi-sphère de rayon r =1km, une puissance surfacique de
$X = 0,5.P / (2.Mr^2) = 50/(6,28.10^6) = 16.10^{-6}$ W/m2 = 16 µW/m2

L'affaiblissement par diffusion spatiale est dû au fait que l'énergie émise diverge à partir de

9 *Maximal Usable Frequency*, fréquence maximum utilisable : on rappelle qu'à tout moment il existe une fréquence (observée par sonde ionosphérique) telle que les ondes de fréquence supérieure traversent l'ionosphère et ne sont donc pas renvoyées vers le sol, ce qui les rend impropres à des liaisons terrestres (mais utilisables pour des liaisons de la Terre vers l'espace, ce qui n'est pas notre propos ici).

l'antenne d'émission, mais qu'une certaine convergence est provoquée par la forme sphérique des couches ionisées, jouant ainsi le rôle d'un miroir concave (cf. Boithias, p.228 et 229, dont fig. 9.11). Pour 6000 km en 2 bonds via la couche F, cet affaiblissement est de 69 dB par rapport à une référence à 1 km de l'antenne d'émission et pour une hauteur de la couche F de 240 km ; en plaçant la couche F à 400 km, un calcul trigonométrique donne une majoration de 0,4 dB, négligeable).

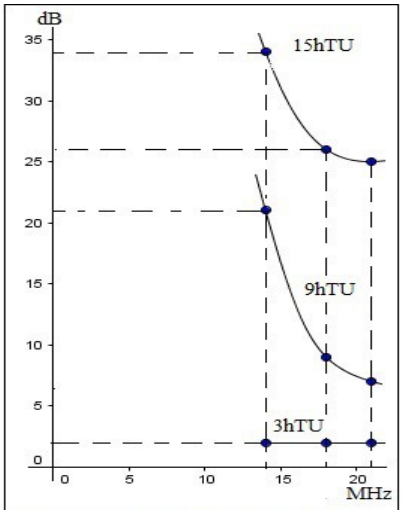


L'affaiblissement par <u>réflexion sur la mer</u> (cf. Boithias, p.229) est de 1dB en incidence faible comme c'est le cas ici.

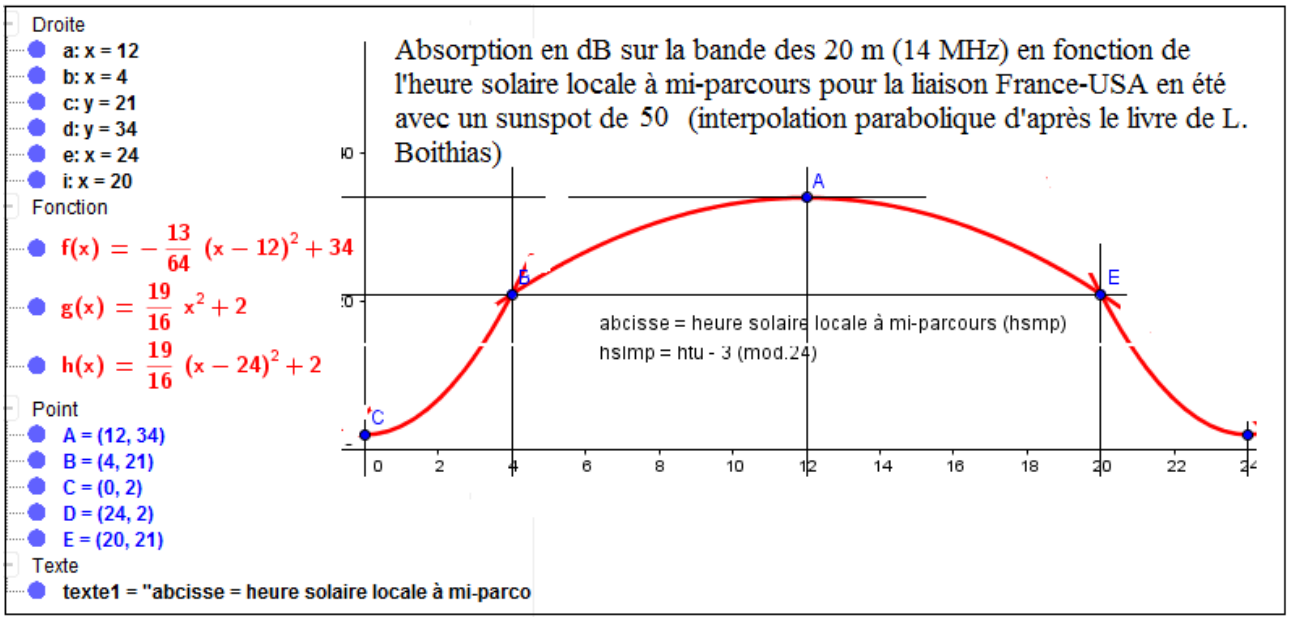
L'affaiblissement par <u>absorption ionosphérique</u> est celui qui varie en fonction de l'ionisation, donc d'une expérimentation à l'autre (cf. Boithias, p.229 et 230, dont fig. 9.12) ; on va l'estimer à partir de l'abaque de la page 230 en interpolant sur la distance (l'abaque est faite pour 4200 km, notre TIPE vise 6000 km), sur les heures en considérant que les 3 courbes correspondant à l'été correspondent à l'heure solaire à mi-parcours (minuit, midi, lever et coucher du soleil. D'où le nouvel abaque et les interpolations correspondantes donnant l'affaiblissement y par absorption en fonction de l'heure solaire locale à mi-parcours hslmp = x = TU-3 (modulo 24) , donc de l'heure TU = htu = x', et de la fréquence[10] :
si $3 < htu < 24 \Rightarrow hslmp = x = htu - 3$
si $0 < htu < 3 \Rightarrow hslmp = x = htu + 21$
si $0 < x < 4 \Rightarrow y = (19/16).x^2 + 2$
si $4 < x < 20 \Rightarrow y = (-13/64).(x-12)^2 + 34$
si $20 < x < 24 \Rightarrow y = (19/16).(x-24)^2 + 2$
Cette absorption est donnée pour une activité solaire faible : on supposera le sunspot égal à 50 (ssn = 100) et on supposera au départ que cet affaiblissement varie comme le sunspot,
soit y' = y.sunspot/50 (cf. abaques page suivante).

<u>En récapitulant ces 3 affaiblissements</u>, on obtient donc, à l'antenne de réception, une onde de puissance surfacique X' telle que : 10.log(X'/X) = -69dB-1dB-(affaiblissement par absorption)
Pour les 7 expérimentations retenues, on obtient alors une valeur de X' , de laquelle on déduit la puissance P' délivrée par l'antenne de la balise[11] à son récepteur (pour 14 MHz, donc Θ= 21 m)
$P' = X'.G'.\Theta^2/(2.\pi^2) = X'.21^2/(2.3,14^2) = 22.X'$ (avec X' en Watts/m2 et P' en Watts).
P' peut alors être comparée à la puissance reçue par les balises lors des expérimentations.

10 On ne va s'intéresser qu'au cas de la bande 14 MHz, les expérimentations ayant confirmé que les 2 autres bandes sont beaucoup moins souvent ouvertes, et on interpole entre les valeurs à l'aide paraboles car une interpolation linéaire donne des variations trop brutales, peu imaginables dans la réalité.
11 Hypothèse sur le gain G' de l'antenne de la balise : facteur 1, soit 0dB).



absorption ionosphérique en été en année de faible activité solaire pour la liaison France Amérique du Nord (côte Est) d'après transposition Boithias (cf. bibli. 1) pour les 3 bandes 14, 18 et 21 MHz



3 – b – 2 -- <u>application de cette méthode aux 9 expérimentations retenues</u> :

Elle conduit aux tableaux EXCEL qui suivent, avec les hypothèses supplémentaires suivantes :
- pour chaque expérimentation, on a pris une « balise moyenne » et un « niveau de signal moyen »
- on a supposé que les récepteurs des balises avaient un seuil de sensibilité standard[12]
- on a supposé que les niveaux indiqués par les balises, bien qu'en « s/n » l'étaient avec un niveau de bruit correspondant à ce seuil de sensibilité[13] :

12 Seuil de sensibilité = 5µV sur une impédance de 50 Ohms, soit une puissance $P = U^2/R = (5.10^{-6})^2/50 = 0{,}5$ pW (ce seuil est plus élevé que ce qu'indiquent les fabricants de récepteurs, mais ils ne tiennent pas compte du bruit...

13 Par exemple, si une balise indique qu'elle a reçu un signal avec s/n=11 dB, cela signifie que la puissance délivrée par son antenne à son récepteur valait (+11dBW–131dBW) = (-120dBW) => $P' = 10^{-120/10} = 10^{-12}$W = 1pW

Le 1er tableau est celui tiré de la récapitulation générale, d'où on a supprimé ce qui traitait des bandes autres que le 14 MHz et les informations concernant les aurores boréales puisqu'il n'y en a eu aucune lors des expérimentations (on évoquera ce point plus loin) :

Récapitulation des 7 expérimentations sélectionnées

exp.			rétro-balises	SOHO	USA	USA	Belgique	Belgique	Australie	Allem.	Allem.	Allem.	Allem.	Allem.	Allem.	VOACAP
n°	jour	TU	14 MHz		K	A	MUF (MHz)	alt réfl. Km	comm.	A	K	sunspot	flux	act. Sol.	act. Géom.	proba.
1	03/07/15	9	4 (moy. 16 dB)	erupt.	3	3	20	500		6	2	73	114	erupt	quiet	60%
5	09/07/15	3	7 (moy. 12 dB)	erupt.	1	5	16	350	normal	8	2	118	133	erupt.	quiet	66%
11	21/07/15	2	4 (moy.12 dB)	erupt.	2	3	13	300	depr. 30 %	10	2 à 3	46	99	erupt	active	57%
16	01/08/15	2	5 (moy. 13 dB)	erupt.	3	12	12	525	storm warn.	19	3	83	102	quiet	minor storm	9%
17	04/08/15	5	10 (moy. 9 dB)	quiet	2	11	13	340	depress.	10	2	51	102	quiet	quiet	4%
14	28/07/15	5	0	quiet	2	11	16	500	normal to fair	14	3	53	100	quiet	quiet	2%
15	09/08/15	5	0	erupt.	2	12	10	350	normal	15	2	92	121	erupt	quiet	0%

D'où l'on extrait un 1er tableau nous limitant aux 2 seuls indicateurs d'activités solaire et géomagnétique (« sunspot » et K) facilement accessibles en cas de crise[14] :

Récapitulation des infos utiles

exp.			balises (en dB)	USA	Allem.
n°	jour	TU	report moyen	K	sunspot
1	03/07/15	9	16	3	73
5	09/07/15	3	12	1	118
11	21/07/15	2	12	2	46
16	01/08/15	2	13	3	83
17	04/08/15	5	9	2	51
14	28/07/15	5	0	2	53
15	09/08/15	5	0	2	92

D'où le tableau des calculs conduisant aux bilans énergétiques des différentes expérimentations :

bilans énergétiques des expérimentations

exp.	balises (dB)	balises (pW)	Allem.											
n°	report	report	sunspot	TU	hslmp	y	y'	y' arron.	10.log(X'/X)	X'/X	X (W/m2)	X' (W/m2)	P' (Watts)	P' arron. (pW)
1	16	3,16227766	73	9	6	26,688	38,96	19	-89	1,26E-009	1,60E-005	2,014E-014	4,43E-013	44
5	12	1,258925412	118	3	0	4,75	11,21	11	-81	7,94E-009	1,60E-005	1,271E-013	2,80E-012	28
11	12	1,258925412	46	2	23	9,4219	8,668	9	-79	1,26E-008	1,60E-005	2,014E-013	4,43E-012	4
16	13	1,584893192	83	2	23	9,4219	15,64	16	-86	2,51E-009	1,60E-005	4,019E-014	8,84E-013	88
17	9	0,630957344	51	5	2	13,688	13,96	14	-84	3,98E-009	1,60E-005	6,370E-014	1,40E-012	1
14	aucun	aucun	53	5	2	13,688	14,51	15	-85	3,16E-009	1,60E-005	5,060E-014	1,11E-012	1
15	aucun	aucun	92	5	2	13,688	25,19	25	-95	3,16E-010	1,60E-005	5,060E-015	1,11E-013	1

On voit que pour les 5 premières lignes, qui correspondent aux expérimentations lors desquelles la bande était ouverte, les calculs aboutissent aussi à trouver que la bande était ouverte, ce qui plaide en faveur de la validité du modèle suivi (la puissance P' calculée est supérieure au seuil de sensibilité du récepteur) ; on peut toutefois noter une trop grande grande dispersion des résultats, qui ne permet pas la prévision du niveau du signal reçu (les balises elles-mêmes donnent des résultats très disparates lors d'une même expérimentation). En particulier, l'expérience n°17, qui est celle qui correspond au plus grand nombre de balises ayant répondu est aussi celle qui aboutit, par calcul au plus faible signal...

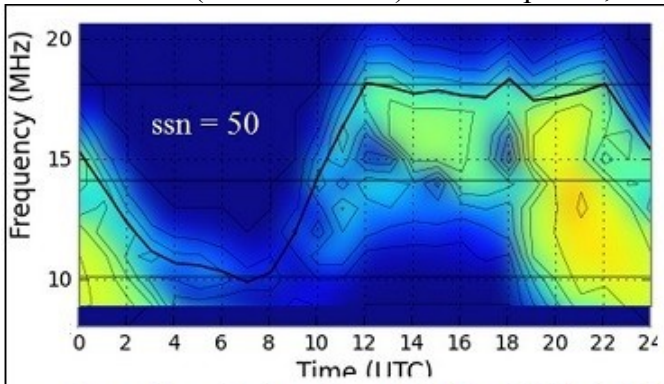
Pour les 2 dernières lignes, en revanche, il y a incohérence entre les résultats du calcul et ceux des

14 En cas de crise, ce qui est une des hypothèses de départ de cette étude, l'absence d'accès à internet limiterait l'information disponible à celle diffusée par radio depuis l'étranger, à savoir l'indicateur K (activité géomagnétique) et le « sunspot number » (taches solaires).

expérimentations puisque la bande était fermée alors que le calcul tendrait à dire le contraire. Deux explications envisageables : soit des perturbations du champ géomagnétique (l'observatoire australien annonçait la possibilité de telles dégradations), soit une MUF trop basse, ce que nous allons examiner maintenant.

3 – b – 3 calcul théorique du niveau de la MUF[15] :

La MUF peut être un facteur d'ouverture/fermeture de la bande. Les valeurs moyennes qu'elle prend en été pour la liaison qui nous intéresse sont données par des abaques qu'on peut trouver par exemple via VOACAP. Elle semble varier linéairement avec le sunspot, au moins dans la plage qui nous concerne (entre 50 et 150). En interpolant, on arrive aux formules suivantes :



La MUF varie avec l'heure TU (htu) et le sunspot (ssn). Ci-contre, en été, pour une liaison transatlantique, la MUF moyenne observée. On peut donc l'interpoler à l'aide d'une droite de 12 à 22h TU, et par une parabole de 22 à 12h TU.
Ceci conduira aux formules ci-dessous :
qui semble correspondre aux MUF moyennes observées

- si ssn = 50 et si 0<htu<12 => MUF50 = (8/49).(x-5)^2+10
- si ssn = 50 et si 12<htu<22 => MUF50 = 12
- si ssn = 50 et si 22<htu<24 => MUF50 = (8/49).(x-29)^2+10

Et, pour un sunspot quelconque, on interpolera avec la formule linéaire suivante :

- si ssn = x quelconque => MUF(x) = MUF50 + (4/50).(x-50)

qui semble correspondre aux MUF moyennes observées

Appliqué aux 7 expérimentations qui nous intéressent, cela donne les résultats suivantes :

calcul des muf théoriques lors des 7 expérimentations sélectionnées

exp.			rétro-balises	Allem.	MUF	MUF théor.	Belgique
n°	jour	TU	14 MHz	sunspot	calcul	arrondie	MUF observée
1	03/07/15	9	4 (moy. 16 dB)	73	14,452244898	14,4	20
5	09/07/15	3	7 (moy. 12 dB)	118	16,093061224	16,1	16
11	21/07/15	2	4 (moy.12 dB)	46	11,149387755	11,1	13
16	01/08/15	2	5 (moy. 13 dB)	83	14,109387755	14,1	12
17	04/08/15	5	10 (moy. 9 dB)	51	10,08	10,1	13
14	28/07/15	5	0	53	10,24	10,2	16
15	09/08/15	5	0	92	13,36	13,4	10

Ce tableau amène plusieurs commentaires :
- dans un premier temps, ne nous intéressons pas à la dernière colonne (MUF observée par la sonde ionosphérique de Dourbes en Belgique).
- les 2 dernières lignes, qui correspondent aux 2 expérimentations lors desquelles la bande était fermée alors que l'heure (5h TU) était habituellement une heure à laqulle elle était ouverte, donne des résultats cohérents avec les expérimentations : la MUF donnée par le calcul y est inférieure à 14 MHz et, donc, les signaux ne sont pas renvoyés vers le sol par l'ionosphère
- pour les 5 autres lignes, qui correspondent aux 5 expérimentations lors desquelles la bande était ouvertes, le résultat est mitigé : 3 d'entre elles donnent une MUF supérieure à 14 MHz et il est donc

15 *Maximal Usable Frequency*, fréquence maximum utilisable : on rappelle qu'à tout moment il existe une fréquence (observée par sonde ionosphérique) telle que les ondes de fréquence supérieure traversent l'ionosphère et ne sont donc pas renvoyées vers le sol, ce qui les rend impropres à des liaisons terrestres.

normal que la bande soit ouverte ; en revanche, pour les 2 autres, la MUF est inférieure à 14 MHz et la bande aurait alors dû être fermée, ce qui n'était pas le cas.
- si maintenant nous nous intéressons à la dernière colonne et comparons les MUF calculées (théoriques) aux MUF observées, on ne trouve aucune cohérence sauf dans un cas (la 2ème ligne où les MUF sont identiques). Une explication à cela peut être les suivante : la sonde de Dourbes mesure la MUF à sa verticale, donc relativement loin de l'endroit où l'onde émise de Bretagne pénètre l'ionosphère dans son trajet vers l'Amérique au-dessus de l'Atlantique Nord. La mesure faite à Dourbes semble donc inappropriée à notre étude mais il n'existe malheureusement pas de sonde ionosphérique au-dessus de l'Atlantique (la raison à cela est que ces sondes envoient des signaux à leur verticale)[16].

3 – b – 4 – <u>que peut-on dire de l'influence du champ magnétique terrestre</u> ?

L'observatoire qui est le plus explicite à ce sujet est celui d'Australie, comme le montrent ses avis émis lors de chaque expérimentation. Toutefois, on peut remarquer que ces avis sont le plus souvent sous forme de « *magnetic storm warning* » (avis d'orage magnétique) conduisant à rendre plus difficile les liaisons radio par voie ionosphérique[17], en particulier dans les zones de latitudes hautes (les aurores boréales ou australes étant des cas extrêmes, que nous n'avons malheureusement pas pu constater lors de ces expérimentations). Même les logiciels de prévision de propagation ne prennent en compte le géomagnétisme que comme un élément de vigilance (à l'image de ce qui se passe avec la météorologie troposphérique et les avis de vigilance orange que lance parfois MétéoFrance). Nous n'aurons donc pas l'ambition d'aller au delà dans ce domaine.

4 - Conclusion générale du TIPE

L'objet du TIPE était d'étudier comment une onde radio se propage entre France et Amérique du Nord à travers l'ionosphère. Cette étude s'effectuait à travers un exemple concret : une situation de crise interdisait l'usage des moyens « normaux » de communication (téléphone, radio, satellites, etc.), et seule l'émission radio clandestine était possible (un peu comme pendant l'Occupation, quand la Résistance émettait vers l'Angleterre, sauf que l'Amérique est 15 fois plus loin...).

L'étude a été effectuée à base d'expérimentations (22 au total) consistant à :
- émettre des signaux radio en direction de l'Amérique du Nord sur 3 bandes OC (20m, 17m, 15m)
- là-bas (USA, Canada), une quinzaine de balises étaient capables de les recevoir et de les analyser
- ces balises publiaient en temps réel cette analyse sur un site internet
- simultanément des données ionosphériques et solaires et géomagnétiques étaient recueillies auprès d'observatoires[18], puis analysées pour rechercher des corrélations entre ces données et la faisabilité de la liaison transatlantique, de façon à éventuellement disposer d'outils rustiques de prévision

Sur ces 22 expérimentations, 13 ont obtenu des réponses des balises et 9 n'en ont pas obtenu ; 15 balises ont fourni au total 53 réponses (39 sur 20m, 8 sur 17m, 6 sur 15m). En outre, la plupart de ces réponses se situent lors d'expérimentations entre 2 et 5 heures TU. Donc <u>la première conclusion est qu'indépendamment de toute autre considération, il faut émettre sur la bande 20 m et en deuxième partie de nuit</u>.

16 Une autre explication est à caractère statistique : la MUF théorique calculée l'est à parir d'un abaque donnant les valeurs de probabilité 50% à un moment donné, alors que la MUF mesurée par la sonde ionosphérique est une valeur constatée (c'est la même différnce qu'il y a entre la probabilité qu'il pleuve et la pluie constatée).

17 La difficulté pouvant prendre plusieurs formes : abaissement de la MUF, niveau de bruit très élevé, déformation des signaux jusqu'à les rendre inintelligibles.

18 Hélio-satellite SOHO, Boulder (USA), Dourbes (Belgique), Scheggerott (Allemagne), Sydney (Australie).

La recherche de corrélations entre l'ouverture de la bande et les conditions observées (ionosphère, activité solaire, activité géomagnétique) a abouti aux conclusions suivantes :

- l'activité solaire (indicateurs « sunspot » ou « flux ») qui commande, en fonction de l'heure, l'ionisation de la haute atmosphère et donc la possibilité pour les ondes d'être réfractées, plus ou moins absorbées, renvoyées vers le sol, et d'arriver jusqu'en Amérique après 2 bonds de de 3000 km et réflexion sur l'océan, est avérée comme outil de prévision :

* un modèle simple de calcul de bilan énergétique de l'onde de l'émetteur vers le récepteur (après diffusion spatiale, absorption ionosphérique, réflexion) est possible à partir de l'indicateur « sunspot » (qui est disponible par radio à partir d'émetteurs situés hors de France).

* un autre modèle simple de calcul de la MUF sur le parcours de l'onde (fréquence maximum utilisable au-dessus de laquelle l'onde n'est pas renvoyée vers le sol) est possible à partir du même indicateur « sunspot » et d'abaques connues.

- l'activité géomagnétique (indicateurs « A », « K » et aurores boréales ou australes ») n'a pas pu être corrélée avec les résultats des expérimentations (absence d'aurores polaires pendant la période des expérimentations ; aucun lien constaté entre les autres indicateurs et les résultats). Il est révélateur que les observatoires utilisent l'état du champ magnétique terrestre comme un indicateur d'alerte à perturbation des communications plus que comme un outil de mesure à proprement parler.

D'autres observations auraient pu être faites, telles que l'écoute des bandes OC de radio-diffusion : leur ouverture ou non-ouverture est révélatrice de l'état général de l'ionosphère. En outre, il ne faut pas oublier que, comme en matière de météorologie en général, toutes les prévisions ont un caractère probabiliste : par exemple, les outils professionnels de prévision expriment leurs résultats sous la forme «suivante « *... la MUF sur cette liaison et à cette heure est de 15 MHz avec une probabilité de 50 %... »*. Et un échantillon de 22 expériences est statistiquement insuffisant pour aboutir à une réponse significative aux questions posées.