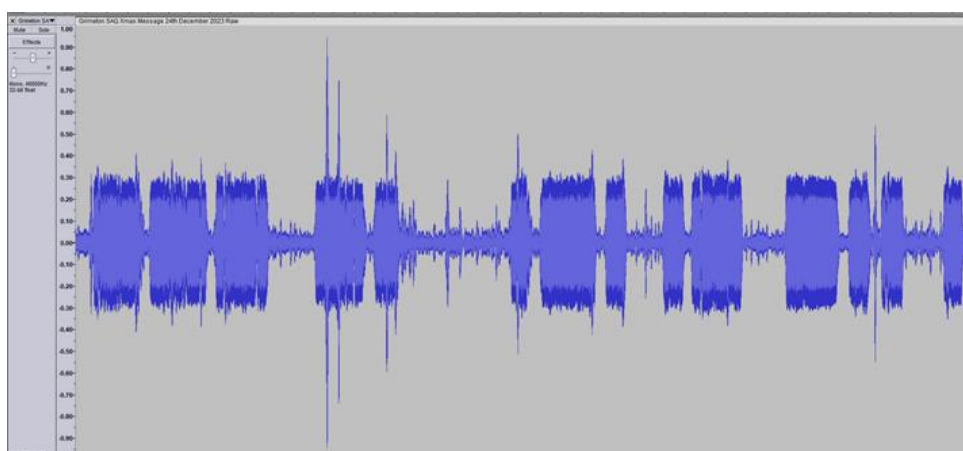




## Le monde mystérieux des UBF-TBF



Exemple de réception de la station SAQ émettant en CW sur 17.2 kHz,  
réalisée le 01/12/2024 aux Pays-Bas

## Partie 2 : Les émissions artificielles dans les domaines UBF/TBF

### La réglementation

Comme tous les segments du spectre radioélectrique, l'utilisation des bandes de fréquences des domaines UBF/TBF est réglementée au niveau mondial, sauf en dessous de 9 kHz qui est considérée comme étant la limite en-dessous de laquelle aucune utilisation industrielle à longue distance est envisageable. Toutefois des applications à très courte distance dans les domaines médicaux et de de détection de métaux y sont présentes.

Ainsi, entre 9 et 30 kHz, sont autorisées :

- Les applications inductives à très courte distance type boucles antivol, etc
- Les communications avec certains implants médicaux.
- Les signaux pour la radionavigation, la radiolocalisation et les liaisons radio avec les sous-marins.
- Les signaux horaires et étalons de fréquences.
- Les liaisons radio utilisées en spéléologie lors des opérations de secours.

## Les émetteurs destinés à la communication avec les sous-marins

### ***La problématique des communications avec les sous-marins en plongée***

Ces communications sont techniquement très difficiles, du fait qu'aux fréquences habituellement utilisées pour les télécommunications à grandes distances (de quelques MHz à 30 MHz), ces ondes sont incapables de traverser un conducteur électrique épais comme de l'eau salée.

La solution la plus simple est de déployer une antenne radioélectrique à la surface de l'eau et d'utiliser les techniques de télécommunications classiques. Cependant, cette solution ne convient guère aux sous-marins nucléaires lanceurs d'engins qui ont été conçus pour pouvoir rester cachés en immersion au fond des océans pendant des semaines ou des mois. Afin de rester en communication avec ces bateaux militaires sans risquer qu'ils soient repérés, il a fallu aborder la question sous des angles différents.

### ***Les émetteurs TBF***

Dans cette gamme de fréquence (3 à 30 kHz), les ondes électromagnétiques sont capables de pénétrer l'eau de mer sur une épaisseur d'une vingtaine de mètres (épaisseur de peau dans l'eau salée). Ainsi, un sous-marin en plongée peu profonde peut recevoir une communication à très bas débit en utilisant ces fréquences, mais ne peut pas transmettre. Dans le cas de plongée profonde, le navire peut utiliser une bouée munie d'une antenne qui sera déployée un peu en dessous de la surface. Cette bouée peut être suffisamment petite pour ne pas être détectée par un radar ou un sonar.

Les émetteurs à forte puissance des pays opérant une flotte de sous-marins stratégiques peuvent être reçus à des milliers de milles nautiques. Ces émetteurs terrestres couvrent des surfaces de plusieurs kilomètres carrés, avec des puissances d'émission de 20 kW à 2 MW. Malgré des antennes de très grandes longueurs (plusieurs centaines de mètres de haut), le rendement est très faible du fait de l'écart très grand entre les dimensions des antennes et la longueur d'onde.



Exemple du parc d'antennes d'un site d'émission TBF de la marine américaine

Les sous-marins reçoivent les signaux avec des antennes filaires remorquées proches de la surface. La faible bande passante ne permettant pas de transmettre en téléphonie, toutes les transmissions s'effectuent en alphanumérique à très faible débit (quelques caractères par seconde). Les messages sont évidemment codés et utilisent des modulations par décalage de fréquence.

Outre les émetteurs terrestres fixes, des émetteurs embarqués sur avion ont été également développés, utilisant des antennes tractées très longues.

Tous ces émetteurs utilisent des fréquences entre 12 et 25 kHz. Ils sont souvent couplés avec des émissions de signaux horaires très précis, qui sont maintenant remplacées par l'exploitation des signaux émis par les satellites de réseaux de géolocalisation.

### ***Les émetteurs EBF***

Dans cette gamme de fréquence (30 à 300 Hz), les ondes peuvent traverser les océans et atteindre les sous-marins où qu'ils se trouvent. Le système de l'US Navy appelé « Seafarer » émettait sur 76 hertz, et son équivalent de la Marine russe appelé « Zeus », sur 82 hertz. Construire un émetteur sur ces fréquences est une véritable gageure en raison des longueurs d'onde extraordinairement longues mises en œuvre : plusieurs milliers de km !

Pour contourner la difficulté, il a fallu trouver un lieu avec une très faible conductivité électrique du sol (c'est-à-dire le contraire de ce que l'on recherche habituellement en radioélectricité), enterrer deux énormes électrodes, puis les alimenter à partir d'une station située à leur centre. Comme la conductivité du sol est faible, l'énergie entre les deux électrodes va pénétrer profondément à l'intérieur de la Terre et utiliser ainsi une grande partie du globe terrestre comme antenne. Le rendement de l'antenne est très mauvais. Bien que la puissance émise par l'antenne soit très faible, de l'ordre de quelques watts, le signal peut être reçu potentiellement partout sur la planète ; ainsi une station en Antarctique a pu détecter la mise en service de Zeus.

En raison de la complexité technique que représente la construction d'un émetteur EBF, seules l'US-Navy américaine et la Marine russe se sont lancées dans cette aventure. Jusqu'à son démantèlement en septembre 2004, le « Seafarer » américain était constitué de deux antennes situées, l'une dans le Wisconsin depuis 1977 et l'autre dans le Michigan depuis 1980.



Vue aérienne de l'installation américaine EBF de Clam Lake dans le Wisconsin ; On peut voir en bas à gauche les emprises des deux lignes de transmission aériennes perpendiculaires de 23 km qui constituaient l'antenne dipôle au sol qui rayonnait les ondes EBF. Elle a été exploitée entre 1989 et 2004.



L'antenne russe du système Zeus est installée dans la péninsule de Kola près de Mourmansk, avec un espacement des antennes de 60Km.

La transmission EBF se fait à l'aide d'un code de Reed-Solomon sur 64 caractères. Chaque caractère est transmis sous forme d'une longue séquence pseudo-aléatoire. L'intérêt de cette technique est qu'en rapprochant plusieurs messages identiques lors d'une transmission multiple, on peut reconstituer le message initial même avec un rapport signal sur bruit très défavorable. En raison de la faible bande passante due à la fréquence d'émission très basse, l'information ne peut être transmise que très lentement, de l'ordre de quelques caractères par minute.

Il semble que le système EBF russe ne soit plus en service depuis les années 2010. Les communications longues distances avec les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins reposent maintenant principalement sur les systèmes TBF.

## Les émetteurs destinés à la géolocalisation

La généralisation des voyages aériens civils et militaires intercontinentaux ont nécessité le développement, dès les années 40, de dispositif de géolocalisation mettant en œuvre des émetteurs terrestres, dont les dispositifs récepteurs pourraient être intégrés dans de petits volumes. Ces systèmes déterminent la position d'un récepteur en mesurant la différence de temps de propagation entre deux émetteurs (au minimum), le lieu des points à différence égale étant une hyperbole sur la carte. Trois émetteurs sont nécessaires pour un point (intersection d'hyperboles). Pour éviter des géométries imprécises ou ambiguës, quatre émetteurs ou plus sont nécessaires, synchronisés dans une "chaîne".

Les premiers systèmes de géolocalisation furent développés vers 1940-1945 : le LORAN (LONG RANGE Navigation) qui fonctionnait sur 1800 kHz et le DECCA (qui fonctionnait dans la bande 70 à 127 kHz). Ils couvraient une grande partie de l'Atlantique Nord, et leur portée restait limitée à environ 600 km avec une précision de quelques centaines de mètres.

L'apparition des missiles intercontinentaux dans les années 50 a nécessité l'amélioration de ces systèmes de géolocalisation en matière de portée qui devenait mondiale, et de précision qui devait être décimétrique. Ce besoin a abouti au développement du système LORAN-C qui fonctionne autour de 100 kHz. Les émetteurs LORAN-C sont des ensembles volumineux couvrant plusieurs hectares, en raison de l'antenne nécessaire. L'antenne est un pylône de 200 à 400 m muni d'une nappe terminale pour abaisser la fréquence de résonance vers le quart de longueur d'onde à 100 kHz – soit 750 m. La puissance transmise à l'antenne est de plusieurs centaines de kilowatts, voire 1 MW. Toutefois les rendements sont de l'ordre de 10% seulement.



Implantation des émetteurs du réseau de géolocalisation LORAN C vers 1999  
(Plusieurs sites ont été arrêtés depuis)

Avec le développement universel des systèmes de géolocalisation satellitaire type GPS, le maintien du LORAN-C, moins précis et de couverture limitée, est périodiquement remis en cause par les gouvernements pour raison budgétaire. Pour l'instant, il semble qu'un réseau limité de sites LORAN-C sera conservé en secours en cas de panne ou de dégradation du GPS. Un système amélioré appelé LORAN-E est en développement dans ce même but ; il opérera en toute indépendance des systèmes de géolocalisation par satellites (GPS, GLONASS, Galileo, Baidu).

Parallèlement au développement des missiles intercontinentaux, des besoins de géolocalisation pour les sous-marins porteurs de ces missiles sont apparus. Les ondes dans la gamme MF ne pouvant être reçues sous la surface de la mer, il est devenu nécessaire de développer des systèmes de géolocalisation similaires au LORAN-C mais fonctionnant dans la gamme TBF ; ce fut le système Oméga développé par la marine américaine, qui comportait huit émetteurs de très forte puissance dans la bande de fréquence 10 à 14 kHz. Ces ondes ont la propriété de se propager sur toute la surface de la Terre par « guide d'ondes » entre le sol et l'ionosphère. Un mobile pouvait ainsi recevoir partout quatre ou cinq stations et calculer sa position avec une précision de quelques km. Le système, peu précis, lourd et coûteux au sol, a été abandonné dans les années 1990. Un système similaire fut développé par l'ex-URSS. Quelques émetteurs russes dans cette gamme de fréquence semblent encore actifs, probablement comme moyen de secours.

## Les autres émetteurs dans les gammes TBF

Les communications par radio à grande distance ont commencé au début du 20<sup>ème</sup> siècle avec des émetteurs fonctionnant dans le domaine TBF, du fait notamment de l'absence de moyens électronique pour produire des signaux électriques de forte puissance. Le seul moyen d'émission disponible à l'époque était constitué par des alternateurs dont la fréquence de rotation fixait la fréquence d'émission. Pour des raisons mécaniques, la fréquence était limitée à 20 kHz.

Ce type d'émetteurs a rapidement été remplacé par des dispositifs électroniques utilisant les premières lampes sous vide. Le seul émetteur encore en service utilisant un alternateur est la station radio de Grimeton en Suède qui peut émettre sur 17,2 kHz. Il est mis en service quelques jours par an pour transmettre en code morse l'indicatif SAQ de l'émetteur de l'époque et des messages en clair sur les télécommunications.

Les OM intéressés par ce type de réception peuvent consulter le site : <https://www.prinz.nl/SAQ.html> qui comporte plusieurs schémas et suggestions de matériel.

De manière anecdotique, on peut rappeler que les postes de télévision analogiques à tubes cathodiques constituent des sources de rayonnements non négligeables, du fait des oscillateurs utilisés pour le balayage ligne : 15.625 kHz pour le système PAL et 15.734 kHz pour le système NTSC. Les puissances unitaires sont très faibles, mais le très grand nombre de ces émetteurs en faisait une source de rayonnement parasite importante, heureusement en diminution avec la disparition progressive de ce type de téléviseurs.

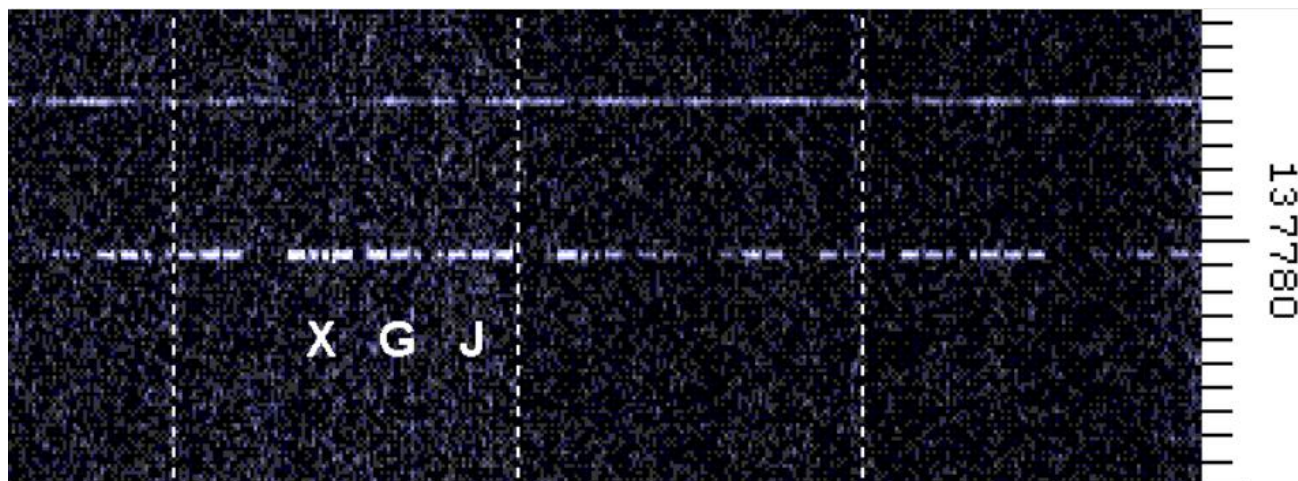
## **Et les radioamateurs dans tout cela ?**

Formellement, l'émission n'est pas autorisée aux radioamateurs dans ces gammes de fréquence ; par contre la réception est tout à fait possible et même très facile. Toutefois la plupart des messages envoyés sont cryptés pour améliorer la fiabilité du décodage et évidemment pour des raisons de confidentialité.

Pour terminer, mentionnons l'existence de la bande 137 kHz pour laquelle les radio-amateurs français sont autorisés à trafiquer entre 135,7 et 137,8 kHz, avec un statut secondaire (non prioritaire par rapport aux utilisateurs principaux). Les modes autorisés sont la CW, le QRSS (CW automatique très lente) et les modes numériques possédant une bande passante inférieure à 200 Hz (par exemple FT8/FT4), avec une Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) inférieure à 1 watt. Cette puissance tient compte du gain effectif de l'antenne et de la ligne de transmission avec l'émetteur. Or dans cette gamme de fréquence, le rendement des antennes habituelles chez les radioamateurs (long fil, boucle, verticale) est

très faible, de l'ordre de -20 à -30 dB, et il est nécessaire d'utiliser des émetteurs produisant plusieurs centaines de watts pour espérer atteindre une PIRE de 1 watt !

Compte-tenu du faible niveau des signaux reçus, la vitesse des émissions en CW est faible, pour améliorer le rapport signal/bruit.



Exemple de réception des signaux émis par WD2XGJ et reçus sur 137.780 kHz par F6CTE en mode QRSS-3 : le « point » en CW dure 3 secondes