La télégraphie par le sol (TPS) a 110 ans !

Première partie : La TPS ? Qu'es aco ?

La **Télégraphie par le sol** (TPS) consiste **en émission** à appliquer sur deux piquets de terre, situés à une distance de 50 ou 100m l'un de l'autre et reliés par deux fils isolés posés sur le sol, une tension alternative (40 V ou plus) à fréquence audible dite « musicale » au rythme de la télégraphie MORSE.

La réception se résume à connecter un écouteur à haute impédance ou, mieux, un amplificateur basse fréquence à un système de fils et de piquets de terre identiques à ceux de l'émetteur. On entendra alors la note émise à distance. Les documents d'époque assurent une portée de 2 à 5 km selon la conductibilité du sol. En pratique expérimentale, à notre époque on entend également bien d'autres choses !

Les ondes hertziennes à haute fréquence ne sont pas utilisées avec ce système. Le Général Ferrié, créateur de la télégraphie sans fil militaire (TSF) est également à l'origine de ce mode de transmission utilisé seulement pendant la première guerre, alors que les transmissions radio existaient déjà, en raison de circonstances propres à l'évènement et en particulier à la fragilité des équipements radio et aux destructions causées par l'artillerie.

L'explication le plus souvent donnée dans les documents de l'époque est **une transmission par induction**. L'ensemble fils plus le sol formerait une boucle dans laquelle circulerait un courant « musical » produit par l'émetteur. Les lignes d'induction qui apparaissent lorsqu'un courant parcourt une boucle sont orientées dans le plan perpendiculaire à la boucle (souvent appelée **cadre en radio**). Si un autre cadre (celui du récepteur) coupe ces lignes d'induction, un courant (atténué) le parcourt et peut actionner un écouteur sensible ou être dirigé vers l'entrée d'un amplificateur basse fréquence.

Il semble évident que la nature du sol et l'orientation des « bases » (les fils) vont alors avoir une très grande importance, ce qui est confirmé par l'expérience. Le sol étant un milieu hétérogène il sera impossible de prédire la portée de la transmission.

Comment cette boucle d'induction peut-elle être créée avec ce dispositif alors que la résistance du sol est très importante ? La différence de potentiel avec le sol à l'extrémité des fils est (et doit être) nulle alors que ces fils sont parcourus par un courant électrique alternatif à fréquence audible ? Il s'établit donc un courant alternatif entre les piquets, mais où va-t-il ? Dans le même ordre d'idées la foudre envoie vers la terre (éclair descendant) ou reçoit de la terre (éclair montant) des courants d'une intensité monstrueuse.

Dans tous les westerns on voit que le télégraphe n'a qu'un seul fil et il est souvent question de : « retour par la terre » alors que le sol n'est que très peu conducteur.

Toutes ces questions ne sont jamais abordées dans les documents techniques de cette époque, o**n constate seulement que les effets sont identiques à ceux d'une boucle d'induction.**

Un peu d'histoire

Nous nous réfèrerons à des documents d'époque.

Depuis l'Antiquité les communications entre formations militaires ont toujours revêtu une grande importance. On se souviendra du coureur de Marathon ou des estafettes de Napoléon Ier. En 1914 on connaît le télégraphe par fils depuis plus de 60 ans, le télégraphe lumineux et en particulier l'« héliostat » (qui, comme son nom l'indique, utilise des éclats de lumière solaire), mais aussi le téléphone et la TSF débutante, qui commence à montrer de bonnes performances. Ces moyens deviennent difficilement utilisables dans la guerre de tranchées, car après la guerre de mouvement lors des premiers mois, les combats vont s'enterrer. A cause de l'artillerie il sera quasi impossible d'établir des lignes télégraphiques filaires à la fois dangereuses à implanter et très rapidement détruites. Dès 1915 on donne au **Colonel Ferrié** la mission de mettre au point un système palliant ces inconvénients. Il sera parfaitement opérationnel l'année suivante et largement utilisé en 1917. Après la fin du conflit, ce système peu performant perdurera un temps mais sera rapidement abandonné car il ne répondait qu'à un besoin spécifique, celui des communications dans les tranchées. Il refera son apparition des dizaines d'années plus tard pour établir des communications avec les spéléologues (Système Nicola).

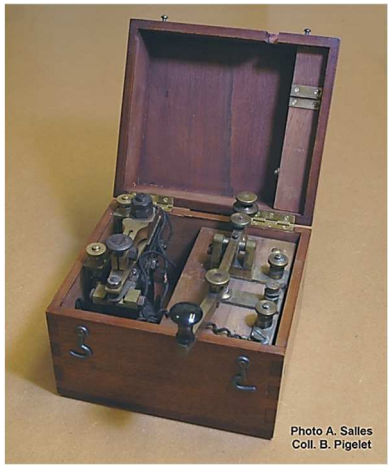
Avec la TPS tout se passe au ras du sol, voire un peu en-dessous, car il était raisonnable de demander à des sapeurs télégraphistes d'entretenir sans s'exposer exagérément un fil de longueur relativement faible.

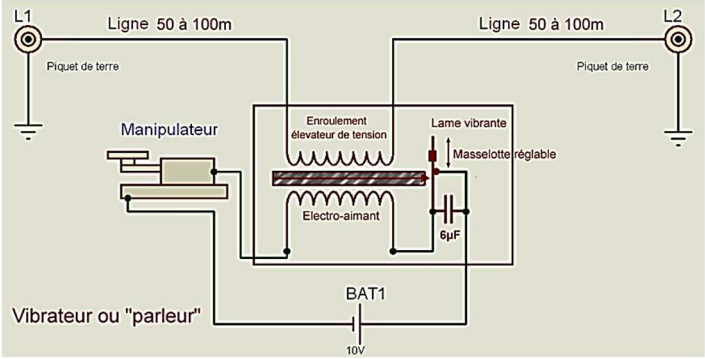
L'un des inconvénients majeurs est que la confidentialité des communications n'est pas assurée : n'importe quel piquet de terre dans une tranchée ennemie permettra de recevoir les communications, mais c'est également le cas pour la télégraphie filaire avec retour par le sol, la téléphonie ou la TSF lorsqu'on a repéré la fréquence d'émission. Pour la TPS (comme pour tous les autres systèmes avec retour par le sol) il n'y a aucune difficulté à espionner l'ennemi : on entend tout grâce à un piquet métallique planté dans le sol. Cela va induire la nécessité de chiffrer les messages télégraphiques, et de trouver de nouvelles solutions techniques pour le téléphone (ligne bifilaire). Ces inconvénients valent de la même façon pour tous les belligérants.

L'émetteur de TPS étant on ne peut plus rustique, sans aucun tube électronique fragile, il est possible de l'installer aux avant-postes afin de transmettre des informations à l'arrière. C'est cette configuration qui a fonctionné dans les débuts, les premières lignes envoyant des informations vers l'Etat Major. Par la suite il a été fabriqué des émetteurs-récepteurs permettant les communications dans les deux sens.

Le matériel d'époque et son fonctionnement

L'émetteur





Les personnes qui ont déjà la connaissance des alimentations à vibreur pour les radios à tubes ne vont pas être désorientées ! Il s'agit de transformer une basse tension de continue de 10 V en haute tension alternative. Il faudra donc un « vibreur » alimentant le primaire basse tension d'un transformateur qui délivrera une haute tension au secondaire, ce système étant appelé « parleur » (Le parleur de Boucherot) à l'époque. En ouvrant et en refermant le circuit du courant continu dans le circuit primaire on obtient une tension « hachée » ou alternative au secondaire élévateur de tension. Pour avoir une tension alternative il serait nécessaire d'utiliser un enroulement primaire à point milieu sur lequel on connecterait le pôle positif de la batterie et on appliquerait alternativement l'une ou l'autre extrémité de l'enroulement au pôle moins, si bien que le courant traverserait en permanence l'enroulement primaire.

Sinon, on se contente d'ouvrir ou de fermer le circuit de l'enroulement primaire. Le rendement est moins bon car la moitié du temps l'enroulement n'est pas alimenté. C'est ce procédé qui a été utilisé à l'époque.

La différence avec les alimentations haute tension à vibreur (tubes électroniques) est double :

- La fréquence d'oscillation doit être de 800 Hz pour la TPS. Elle est plus basse avec les alimentations à vibreur que j'ai pu utiliser, plutôt 200-400 Hz.
- Pour la TPS nul n'est besoin de redressement et de filtrage puisqu'on utilise directement la tension alternative appliquée aux extrémités des fils.

Le vibreur, d'après les documents que nous avons consultés, fonctionnait sur le principe du timbre électrique à courant continu.

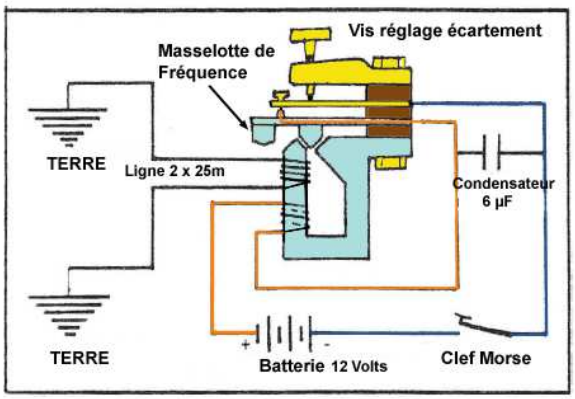
Selon les modèles, la fréquence de vibration était variable, dans les graves ou les aigus. Les versions élaborées utilisaient des masselottes réglables pour modifier la note musicale.

Principe de fonctionnement du timbre électrique

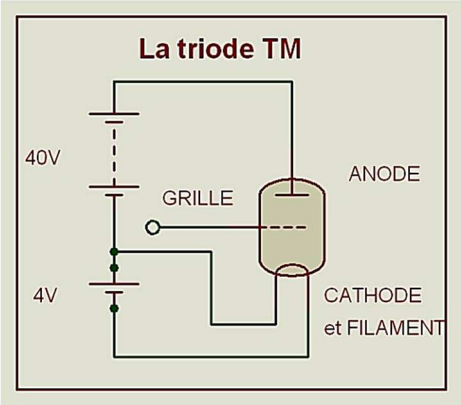
Un électro-aimant attire une lame mobile munie de contacts. Lorsqu'elle est attirée, les contacts s'écartent et ouvrent le circuit dans la bobine de l'électro-aimant qui cesse alors son attraction. La lame élastique revient à la position initiale et ferme à nouveau le circuit, initiant un cycle dont la fréquence est déterminée par un réglage mécanique dépendant des caractéristiques physiques de la lame vibrante. Celle-ci est prolongée par un petit marteau qui vient frapper une cloche.

La lame souple, par un second système de contacts électriques, établissait ou coupait le courant dans le circuit primaire basse tension du transformateur. Les enroulements constituaient à la fois un électro-aimant (voir encadré sur le timbre électrique) et un transformateur élévateur de tension.

Les extrémités de l'enroulement secondaire à haute tension étaient directement connectées aux fils alimentant les piquets de terre. Cette tension était donnée pour environ 4O V.



Le récepteur



Lors d'essais préliminaires il semble que l'on ait utilisé directement un écouteur téléphonique classique à haute impédance mais la portée était trop faible. On a donc connecté aux lignes de réception (dont on avait doublé la longueur) un amplificateur pour basses fréquences utilisant trois tubes triodes, les fameuses « TM » (Triodes Militaires) françaises, qui étaient à l'époque les meilleurs tubes au monde. Ce récepteur est appelé : « R3 ter ».

Il comporte 3 étages d'amplification avec 3 tubes et 3 transformateurs de liaison TR1 à TR3.

- Les lignes captant le signal venant de la terre sont reliées à l'enroulement primaire de T1. Le secondaire envoie le signal vers la grille de la première TM ;
- Le primaire de T2 est monté en série dans le circuit de plaque du premier tube où est disponible le signal amplifié ;
- Le secondaire de T2 envoie le signal vers la grille de la seconde TM.
- Le primaire de T3 est monté en série dans le circuit de plaque de la seconde TM ;
- Le secondaire de T3 est chargé par la grille de la troisième TM ;
- Le signal amplifié est alors disponible au niveau de l'anode de la troisième TM. Le circuit de « plaque » (anode) est alimenté à travers l'écouteur où l'on recueille le signal BF amplifié par les trois tubes.

La Triode

La triode est un tube à vide muni de trois électrodes :

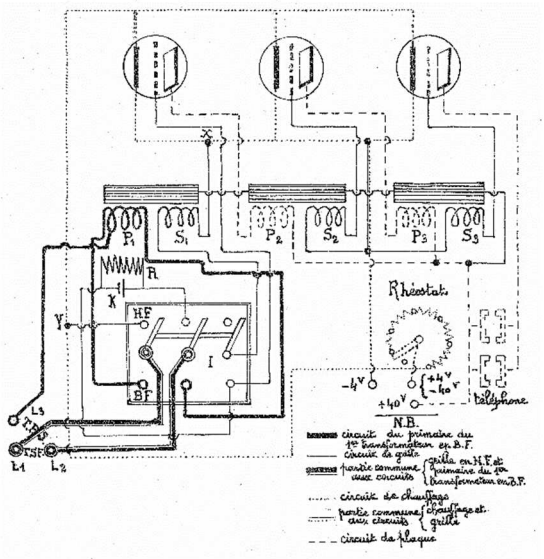
- L'anode ou plaque sur laquelle on applique une haute tension positive ;
- La cathode : haute tension négative ;
- La grille ou électrode de commande.

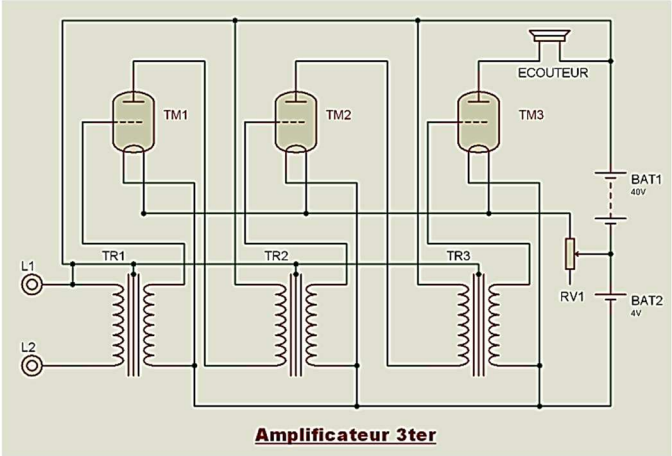
La cathode étant chauffée (filament) émet des électrons qui forment un nuage dans l'espace inter électrodes et un courant s'établit entre anode et cathode (diode).

La grille va intervenir en modifiant ce courant électronique si bien qu'un faible signal alternatif appliqué sur cette électrode se retrouvera amplifié sur la plaque (anode).

Pour augmenter le ratio d'amplification il est possible de monter plusieurs triodes à la suite.

Coll. M. G.





L'émetteur – récepteur

A la fin du conflit des émetteurs-récepteurs ont été disponibles permettant des transmissions bidirectionnelles de l'avant vers l'arrière. Il n'y a pas d'innovation particulière, il s'agit d'un émetteur à « parleur » et d'un amplificateur, logés dans un boîtier unique avec un système d'inversion émission/réception. La batterie pour l'émission étant de 10V et le chauffage des lampes de 4V seulement. Il est donné la possibilité soit d'utiliser une batterie de 4V supplémentaire, soit d'alimenter les filaments en 10V (secours) en insérant une résistance série causant une chute de tension. L'approvisionnement du champ de bataille en batteries chargées a causé un problème logistique, la recharge des batteries n'étant pas simple à réaliser.

Deuxième partie : Une expérimentation

Après avoir lu divers documents sur le sujet j'ai immédiatement constaté que la fabrication d'un système équivalent était extrêmement aisée : à fins d'expérimentation n'importe quel amplificateur basse fréquence moderne y compris acheté pour quatre sous en Chine pouvait convenir ! Tout bricoleur en électronique en possède au moins un pour faire des essais. En ce qui concerne le vibreur j'ai une assez bonne expérience dans le domaine, justement pour fabriquer des alimentations pour des appareils à tubes en partant d'une batterie de 6 ou 12V.

Je possède également, fonctionnant sur le même principe, un appareil d'électrothérapie datant du XIXème siècle fournissant une haute tension à partir d'une pile au zinc-charbon ! Ayant d'ailleurs malencontreusement touché les électrodes destinées à « soigner » les patients, j'ai pris une belle décharge qui m'a fait douter de l'opportunité d'une telle thérapie !

Alors qu'à notre époque on se méfie de toute innovation, aux XIXème et XXème siècles on n'hésitait pas à exposer des personnes à des rayonnements électromagnétiques puissants ou à leur faire boire de l'eau radioactive à des fins curatives. Dans le premier cas si cela ne faisait pas de bien, cela ne faisait pas de mal, il n'en va pas de même pour la seconde méthode !

Les conditions de l'expérience

Le fonctionnement du système ayant été validé au cours de la Grande Guerre, il n'était pas question pour moi d'en vérifier le fonctionnement mais de voir si j'étais capable de reproduire un système équivalent, même en réduction, sans avoir à disposition le matériel d'époque. En fait cela prouverait uniquement ma capacité à en comprendre le principe et à l'appliquer à de nouvelles conditions !

J'avais déjà sous la main un vibreur « presque fait » qui servait d'alimentation de secours pour un poste de radio clandestin du début de la seconde guerre mondiale et un ampli BF à piles fabriqué il y a 25 ans toujours fidèle au poste ! Un transfo 220/6V+6V étant en rayon je possédais l'essentiel… sauf le lieu d'expérimentation car la taille de mon jardin est assez modeste. Je sollicitai alors un ami dont le terrain pourrait nous offrir la possibilité d'établir deux lignes distantes de 50m environ.

Les lignes et piquets de terre

En ce qui concerne les lignes n'importe quel fil électrique fera l'affaire. Les piquets originaux mesuraient environ 80 cm de long en cuivre (des tubes de gros diamètre : 4cm) et il y en avait plusieurs à chaque extrémité pour améliorer la conductivité. Les manuels précisent que la prise de terre doit être excellente. Nous n'avions pas cela sous la main mais il suffirait de quelques longueurs de tuyaux de cuivre pour en fabriquer. Nous avions en revanche de modernes piquets pour les tomates, ces tiges métalliques enroulées en tirebouchon que l'on trouve facilement en jardinerie et qui remplacent les traditionnels piquets de châtaignier. Sans grande précaution nous avons tortillé le fil de cuivre sur ces tiges métalliques.

L'autre extrémité des fils de ligne est reliée à l'émetteur (fiches bananes dans notre cas) ou connectée à l'amplificateur BF. Nous avons utilisé des grip-fils pour notre expérience.

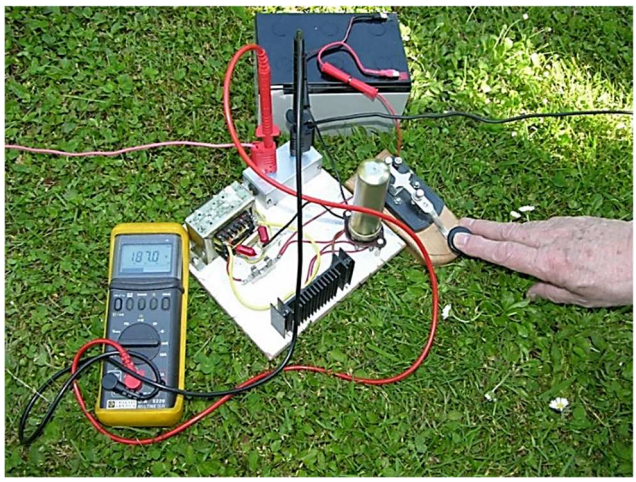
Le récepteur

La photo montre que les extrémités des fils de ligne isolés sont attachées ensemble pour pouvoir les tendre légèrement sans tirer sur les connexions à l'amplificateur BF de fabrication maison. La partie dénudée du fil est reliée par grip-fil ou pince crocodile à l'entrée de l'amplificateur.

L'émetteur

On distingue sur la photo :

- La batterie 12 V de petite taille ;
- Le vibreur maison : l'électronique à circuits logiques est enfermée dans ce qui ressemble à une lampe « octal » à boîtier métallique (En fait un ancien relais). La partie puissance est fournie par deux transistors FET montés sur un radiateur, ce qui semble inutile dans notre cas (aucun échauffement) ;
- Un transformateur 220V vers 2x6V utilisé en élévateur ;
- Des condensateurs de lissage sur le primaire et le secondaire. La valeur de ces composants a été déterminée expérimentalement pour obtenir en sortie un maximum de tension alternative ;
- Un fusible de 4 Ampères dans le circuit primaire du transformateur pour éviter un désastre éventuel ;
- Une clef de manipulation ;
- Un voltmètre connecté sur la sortie en position alternatif pour contrôler ce qui se passe !



Lorsqu'on appuie sur le manipulateur on obtient dans notre cas une tension alternative de 187 V à 800 Hz. Le voltmètre étant donné pour une lecture correcte jusqu'à 1500 Hz, cette valeur doit être proche de la réalité.

L'expérimentation

Dès que l'ampli BF a été mis en route nous avons entendu :

- Un assez fort ronflement caractéristique du courant du secteur. Déjà pendant la Grande Guerre des consignes étaient données pour éviter ce type de parasite ;
- Le « tac…tac… » caractéristique non pas de la mitrailleuse de Saint-Etienne (ouf !) mais d'une clôture électrique qui s'est avérée être située à plus d'un kilomètre du lieu de l'expérience.

Dans ces conditions nous n'avions que peu d'espoir de voir se réaliser une transmission par le sol, et pourtant dès que j'ai appuyé sur le manipulateur notre ami a très bien entendu la note à 800 Hz de la télégraphie. Nous avons changé de place et il m'est apparu que le signal se détachait bien du bruit de fond, avec un timbre très agréable : sans aucun doute nous avions reproduit le fonctionnement d'un système vieux de cent ans !

Continuer l'expérience

Il nous semblerait amusant de continuer cette expérience en tentant de communiquer à de plus longues distances. A mon avis la plus grande amélioration possible serait pour le récepteur en augmentant sa sensibilité. C'est très facile car nous sommes dans le domaine de la basse fréquence et avec une très faible bande passante, loin de HI-FI ou même de la bande passante du téléphone (3000 Hz). Pour cela un simple amplificateur opérationnel devrait être suffisant.

Le revers de la médaille serait que l'on amplifierait également le bruit de fond, sauf à s'installer au milieu d'une zone loin de toute source de 50 Hz.

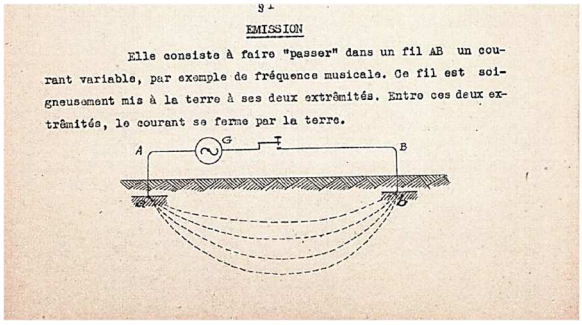
Conclusion

Le seul fait non expliqué reste ce fameux « retour par la terre ». Quand on en parle, peut-être pas aux bonnes personnes, on a souvent une réponse du genre « c'est compliqué » peut-être parfois pour cacher un manque d'informations. Je ne suis pas un génie, mais je pense pouvoir comprendre des choses « moyennement » compliquées !

Etant issu du « primaire » (de l'école s'entend) j'avancerai une théorie personnelle et empirique et espérant recevoir une réponse circonstanciée.

- **Le « retour par le sol » fonctionne** mais avec une déperdition de courant bien supérieure à celle que l'on constaterait avec des conducteurs en cuivre, par exemple ;
- La terre étant au « potentiel zéro » n'en constitue pas moins une énorme réserve d'électrons qui ne demandent qu'à aller faire une petite promenade ;
- Si l'on « injecte » des électrons à l'extrémité d'un fil et si on en « absorbe » à l'autre côté, il me semble que ces mots du vocabulaire banal ne soient pas éloignés de la réalité afin que la terre reste à un potentiel zéro. Cela explique que l'on puisse observer un courant électrique passant dans les fils de la TPS, mais également les éclairs qui vont de haut en bas ou en sens inverse.
- Analogie hydraulique : si l'on pompe de l'eau d'un côté et si on la rejette de l'autre, le niveau du lac reste constant mais il y a bien un courant d'eau qui passe dans les tuyaux.

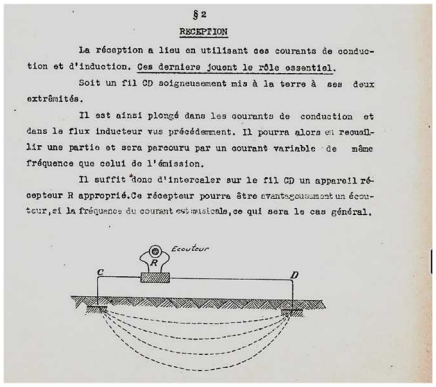
Sans autre explication j'en resterai à celles données dans les manuels militaires* de l'époque où le rédacteur n'hésite pas à tracer des lignes d'induction dans le sol entre les piquets de terre. Qu'en disent les vers de terre ?



§ 1

EMISSION

Elle consiste à faire "passer" dans un fil AB un courant variable, par exemple de fréquence musicale. Ce fil est soigneusement mis à la terre à ses deux extrêmités. Entre ces deux extrêmités, le courant se ferme par la terre.



§ 2

RECEPTION

La réception a lieu en utilisant ces courants de conduction et d'induction. Ces dernière jouent le rôle essentiel.

Soit un fil CD soigneusement mis à la terre à ses deux extrêmités.

Il est ainsi plongé dans les courants de conduction et dans le flux inducteur vus précédemment. Il pourra alors en recueillir une partie et sera parcouru par un courant variable de même fréquence que celui de l'émission.

Il suffit donc d'intercaler sur le fil CD un appareil récepteur R approprié. Ce récepteur pourra être avantageusement un écouteur, si la fréquence du courant est musicale, ce qui sera le cas général.

L'opérateur à l'ombre assis dans les pâquerettes…

Alain Caupène

(*) Lien vers un manuel militaire de la TPS
https://1drv.ms/b/c/5762b7610ce38fd9/IQABwDRW3anDS7ohmVK6fMr8AcwFe2WsocjpozOvbvhQxJs?e=o5Ytsb