

# Fonctionnement des systèmes de « Transmission Par le Sol »

Jean-Paul YONNET

Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble – G2E Lab  
Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP  
23 rue des Martyrs, 38000 Grenoble  
Email : [Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr)

ADRASEC38  
[F1LVT@yahoo.fr](mailto:F1LVT@yahoo.fr)  
[www.F1LVT.com](http://www.F1LVT.com)

Les systèmes de « Transmission Par le Sol » (« TPS ») ont été développés au cours des trente dernières années pour les secours spéléo. Ce mode de transmission permet de communiquer à des distances de plusieurs centaines de mètres dans le sous-sol, dans la bande des 80 kHz. Nous allons effectuer une analyse théorique de ces systèmes de transmission sous terre. Cette analyse permet de mieux comprendre le fonctionnement des transmissions par le sol, comment les utiliser en optimisant leur fonctionnement et les voies à explorer pour améliorer le système.

## Est – ce vraiment de la radio ?

La question peut sembler farfelue, mais la réponse n'est pas immédiate.

Pour avoir une onde radio, il faut être à une distance suffisante de l'émetteur. On considère généralement que l'onde radio avec ses champs magnétiques et électriques perpendiculaires à la direction de propagation (vecteur de Poynting) ne se forme qu'au-delà d'une distance de l'ordre de 3 fois la longueur d'onde. Cette onde est complètement formée à  $10 \lambda$ . Pour la fréquence utilisée de 80 kHz, la longueur d'onde est de l'ordre de 4 kilomètres. Il faudrait se placer à plus de 12 km de l'émetteur pour capter une onde radio. Dans notre cas, à plusieurs centaines de mètres, l'onde radio n'est pas formée et on a un couplage magnétique direct entre l'émetteur et le récepteur. On est dans la zone de Raleigh, appelée aussi « zone de champ proche » par opposition au « champ lointain ». En conséquence le système de transmission par le sol s'apparente à l'inductance mutuelle entre 2 bobines espacées.

Un moyen simple pour vérifier qu'on est en transmission par couplage de champ magnétique entre deux boucles et pas en transmission radio, c'est de regarder la position respective des 2 boucles. Par rapport à l'orientation de la première boucle, quand la seconde est orientée pour recevoir le maximum de flux de la première, on est en couplage par champ magnétique. En onde radio, la boucle de réception est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Autre point important, en onde radio le champ décroît en  $1/r$  et la puissance reçue en  $1/r^2$ . En couplage magnétique, le champ décroît en  $1/r^3$  et la puissance en  $1/r^6$ . La distance entre émetteur et récepteur doit être aussi réduite que possible. En plus, il faut avoir un récepteur à haute impédance d'entrée pour détecter le champ magnétique plutôt que la puissance transmise.

L'analogie avec la radio est essentiellement due au fait que le champ magnétique transmis est modulé par la parole. Le champ magnétique alternatif à 80 kHz est modulé par des signaux entre 300 Hz et 3000 Hz. Le bruit du champ magnétique est important en particulier en surface, ce qui conduit à utiliser des modulations à faible largeur de bande comme la BLU.

Ces systèmes sont connus » dans la littérature scientifique sous l'appellation « magnetic field communication » ou « magneto-inductive communication ». Les systèmes NFC (Near Field Communication) fonctionnent sur le même principe mais à fréquence beaucoup plus élevée (souvent 13,56 MHz) et à distance plus réduite. Pour maximiser la portée, les bobines émettrices et réceptrices fonctionnent en principe à la résonance, mais un facteur de qualité Q trop élevé réduit la bande passante pour la modulation.

Dans cette étude, nous n'allons pas regarder les aspects modulation. Nous resterons sur la partie couplage entre émetteur et récepteur. Nous continuerons d'utiliser l'appellation « antennes » pour les 2 fils placés de part et d'autre de l'émetteur même si ce ne sont pas des antennes.

### **Les émetteurs récepteurs de type « Système Nicola »**

Le « Système Nicola » a été développé dans l'Isère pour les secours en spéléologie avec 3SI (Spéléo Secours de l'Isère). C'est le résultat d'un très gros travail de recherche expérimental (ADRASEC 38), suivi par des fabrications en petites séries (Fondation Nicola). Il a beaucoup évolué au cours des 2 dernières décennies. Il a même été copié récemment sous le nom de « Pimprenelle » .... Toute l'histoire du « Système Nicola » est très bien présentée dans Wikipédia [1]. Toutefois, l'explication dans Wikipédia du fonctionnement par « rayonnement électrique » montre que le fonctionnement de ce système n'a pas été bien clarifié.



*Photo 1 : Système Nicola, système de transmission par le sol*

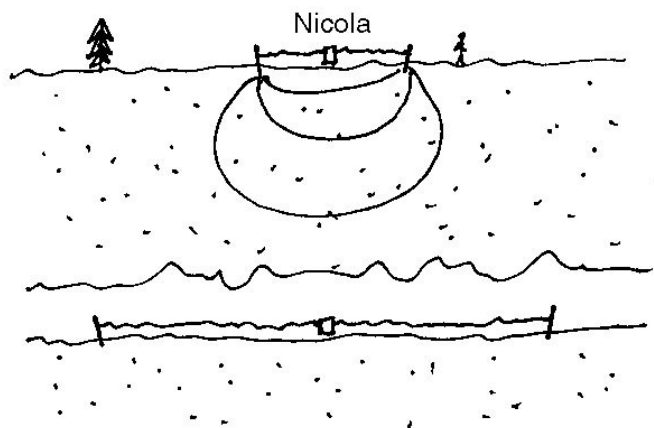


Figure 1 : Couplage entre l'émetteur et le récepteur

Ces systèmes sont composés d'un boîtier central et de deux fils d'antenne de plusieurs dizaines de mètres de longueur à tendre de part de d'autre. Les extrémités de ces 2 fils sont mises à la terre. L'ensemble de ces 2 fils d'antenne et du retour par le sol constitue une grande boucle de courant.

Le retour par le sol présente une résistance importante. A cause de cette résistance notable de la spire, elle ne fonctionne probablement pas à la résonance mais en charge directe dissipative sur l'émetteur.

### Approche théorique

Le milieu sous-terrain est loin d'être homogène.

Sur le plan électrique, le sol est conducteur, mais avec des résistivités qui dépendent beaucoup des couches traversées. Les lignes de courant passent préférentiellement dans les couches les plus conductrices.

#### Résistivité ( $\Omega m$ ) de différents terrains

Nature du terrain	Résistivité en $\Omega m$
terrains marécageux	1 à 30
limon	20 à 100
humus	10 à 150
tourbe humide	5 à 100
argile plastique	50
marnes et argiles compactes	100 à 200
marnes du jurassique	30 à 40
sables argileux	50 à 500
sables siliceux	200 à 300
sol pierreux nu	1 500 à 3 000
sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
calcaires tendres	100 à 300
calcaires compacts	1 000 à 5 000
calcaires fissurés	500 à 1 000
schistes	50 à 300
micashistes	800
granit et grès	1 500 à 10 000
granit et grès très altérés	100 à 600

Tableau I : Résistivité du sol (Sce : FormaTIS sur internet)

Les ordres de grandeur de la résistivité du sol dépendent beaucoup de la nature de ce sol (Tableau I). Entre 2 piquets espacés de plusieurs dizaines de mètres, la résistance du sol peut être de l'ordre de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'ohms.

Le flux magnétique peut être atténué par des courants de terre induits en traversant le sous-sol. Cet effet existe toujours, mais il reste faible car la résistivité du sol est élevée par rapport à celle des métaux par exemple. A titre de comparaison la résistivité du cuivre vaut  $1,8 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$  alors que celle du sol est en  $\Omega\text{m}$ .

Certaines roches peuvent canaliser légèrement le champ magnétique. Mais cet effet reste généralement très faible sauf peut-être dans certaines mines de fer, de nickel ou de cobalt ...

Pour l'émetteur, les longueurs des fils d'antenne utilisées, de l'ordre de 2 fois plusieurs dizaines de mètres, peuvent être considérées comme courtes par rapport à la portée utile de plusieurs centaines de mètres. L'émetteur peut donc être considéré comme un dipôle magnétique qui génère un moment magnétique  $\mathcal{M}_E$ .

Pour le récepteur, la tension induite est générée par le flux magnétique envoyé par le moment magnétique  $\mathcal{M}_E$  dans la surface  $S_R$  du récepteur.

Il existe aussi un autre mode de transmission, qui fonctionne par les courants électriques dans le sol dans certains cas assez particuliers. Nous étudierons cet effet à la suite de la partie « transmission par champ magnétique », et nous comparerons les 2 modes de transmission.

En électromagnétisme, la mise en équations est souvent effectuée par des opérateurs de type gradient ou laplacien et par les équations de Maxwell. Pour faciliter la lecture de ce document, nous n'utiliserons que les notions nécessaires, comme le moment magnétique, et des formulations analytiques relativement simples. Les données chiffrées ne sont qu'indicatives car elles dépendent de très nombreux paramètres.

### Calcul du moment magnétique de l'émetteur

Quand un courant  $I_E$  parcourt une spire de surface  $S_E$ , il engendre le moment magnétique  $\mathcal{M}_E$ , orienté suivant la normale à la spire [2, 3] :

$$\mathcal{M}_E = I_E \cdot S_E$$

où  $I_E$  est le courant dans la spire et  $S_E$  la surface de la spire.  $\mathcal{M}_E$  est en  $[\text{A}\cdot\text{m}^2]$ ,  $I_E$  en  $[\text{A}]$  et  $S_E$  en  $[\text{m}^2]$ .

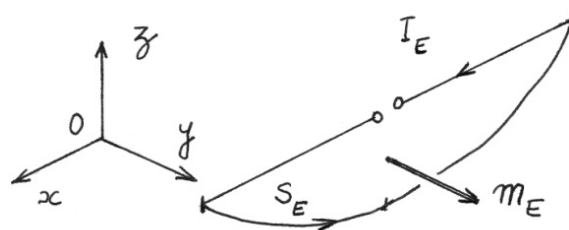


Figure 2 : Moment magnétique  $\mathcal{M}_E$  créé par la spire de l'émetteur orienté selon  $Oy$ .  $S_E$  est la surface de la spire constituée des 2 fils d'antenne et du retour par le sol, cette spire dans le plan vertical  $xOz$  est parcourue par le courant  $I_E$ .

Le courant  $I_E$  est limité par la puissance fournie sur l'émetteur. Quand à la surface  $S_E$ , elle doit être aussi grande que possible pour maximiser le moment magnétique  $\mathcal{M}_E$ .

Dans l'exemple de la Figure 2, la spire est dans le plan vertical  $xOz$ . Elle est parcourue par la courant  $I_E$ . Le moment magnétique  $\mathcal{M}_E$  est orienté selon  $Oy$ , normal au plan  $xOz$ . Pour trouver la direction du moment magnétique en fonction du courant  $I_E$  à un instant  $t$ , on peut utiliser la règle du tire-bouchon.

### Calcul du champ magnétique créé par le moment magnétique

En un point  $P$ , à une distance «  $r$  » du moment magnétique  $\mathcal{M}_E$ , on peut calculer le champ magnétique  $H$  créé par ce moment magnétique. La position de  $P$  est définie par «  $r$  » et par l'angle «  $\alpha$  » que fait  $OP$  avec l'axe du moment magnétique (Figure 3). Le champ magnétique généré  $H$  est donné par ses deux composantes  $H_r$  et  $H_\alpha$  :

$$H_r = (1/4\pi) \cdot (2 \mathcal{M}_E / r^3) \cos \alpha$$

$$H_\alpha = (1/4\pi) \cdot (\mathcal{M}_E / r^3) \sin \alpha$$

Ce champ magnétique  $H$  décroît en  $r^{-3}$ , c'est à dire comme le cube de la distance. C'est une décroissance très rapide : par exemple le doublement de la distance «  $r$  » conduit à une division du champ magnétique par 8.

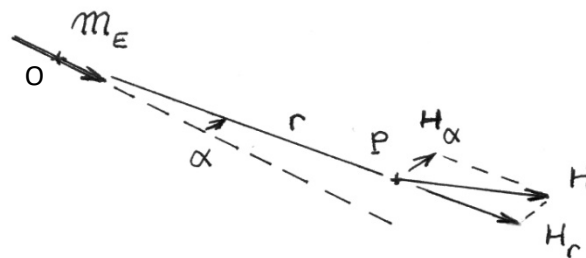


Figure 3 : Champ magnétique  $H$  généré par le moment magnétique  $\mathcal{M}_E$

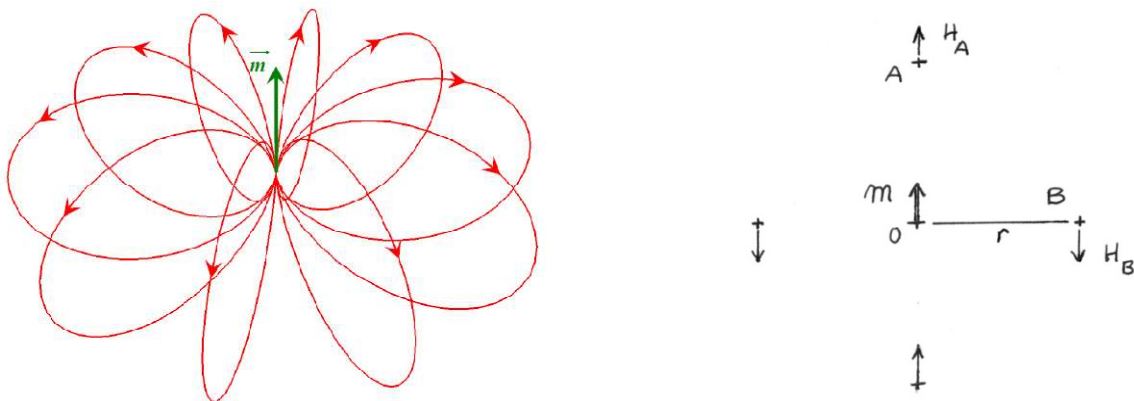


Figure 4 : Champ magnétique créé par un moment magnétique  $\mathcal{M}$ .

A : carte du champ (Sce : <http://gensdelalune.free.fr/mp>),

B : positions de Gauss : en A le champ axial  $H_A$ , en B le champ antiparallèle  $H_B$

Ces expressions montrent aussi qu'à distance identique « r », le champ magnétique est 2 fois plus important dans l'axe du moment magnétique que dans le plan normal. Ce sont les positions de Gauss (Figure 4-B). En A, le champ magnétique  $H_A$  est maximal et il est dirigé dans l'axe du moment magnétique  $\mathcal{M}$ . En B, à la même distance r de  $\mathcal{M}$ , le champ magnétique  $H_B$  est 2 fois plus petit et il est orienté en position antiparallèle par rapport à la direction du moment magnétique.

En se référant aux ordres de grandeur des dimensions du système Nicola, à 400 m de l'émetteur, on peut calculer la valeur de ce champ magnétique alternatif. Il est de l'ordre de  $0,25 \cdot 10^{-6}$  A/m. Pour l'induction B dans l'axe de l'émetteur, elle est autour de  $0,3 \cdot 10^{-12}$  T = 0,3 pT.

### Tension reçue par la spire du récepteur

La variation de flux magnétique  $\Phi$  induit la tension  $V_R$  aux bornes de la spire réceptrice du récepteur. Cette tension  $V_R$  est donnée par :

$$V_R = - d\Phi / dt$$

En sinusoïdal, à la fréquence f, on a :

$$V_R = 2\pi f \Phi_m$$

où  $\Phi$  est le flux magnétique reçu par la bobine réceptrice et  $\Phi_m$  la valeur maximale de ce flux.

Si  $\beta$  est l'angle que fait la spire réceptrice avec le champ magnétique, on obtient :

$$\Phi_m = B S_R \cos \beta$$

Dans les milieux à très faible perméabilité, l'induction magnétique B est proportionnelle au champ magnétique H :

$$B = \mu_0 \cdot H$$

Dans le cas le plus favorable où les moments magnétiques sont alignés ( $\alpha = 0$ ) et où les bobines sont en position de couplage maximal ( $\beta = 0$ ), la tension induite maximale dans la spire du récepteur est donnée par :

$$V_R = (\mu_0 \cdot f) \cdot (S_E \cdot S_R) \cdot I_E \cdot (1/r^3)$$

La constante «  $\mu_0$  » vaut  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  H/m. La fréquence « f » est autour de 80 kHz. Le produit ( $\mu_0 \cdot f$ ) est proche de 0,1 [SI].

Dans le cas d'un couplage antiparallèle, la tension induite maximale dans la spire du récepteur est donnée par :

$$V_R = \frac{1}{2} (\mu_0 \cdot f) \cdot (S_E \cdot S_R) \cdot I_E \cdot (1/r^3)$$

Les termes géométriques sur lesquels on peut jouer, ce sont les surfaces  $S_E$  et  $S_R$ , et la distance « r ». Ces surfaces  $S_E$  et  $S_R$  jouent un rôle symétrique dans l'expression de  $V_R$ .

Le seul terme électrique, c'est le courant  $I_E$  envoyé par l'émetteur dans la spire. Il est limité par la puissance de l'émetteur et la résistance de la spire, principalement due à celle du sol.

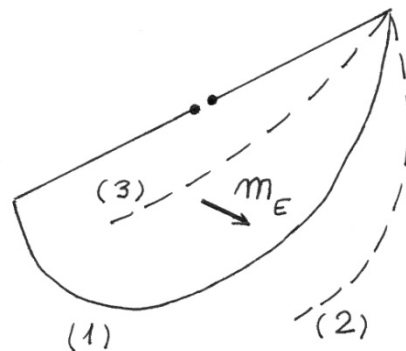
Il faut aussi orienter correctement les 2 spires l'une par rapport à l'autre (angle  $\beta$ ) sinon le cosinus de l'angle peut dégrader le couplage. A  $45^\circ$ , le flux magnétique est réduit de 30%.

En gardant les ordres de grandeur du système Nicola, la tension mesurée  $V_R$  est de l'ordre de  $0,1 \text{ mV} = 100 \mu\text{V}$  à 400 mètres de distance entre l'émetteur et le récepteur.

### Cas de l'émetteur en surface

Pour l'émetteur en surface, la boucle électrique de la spire est constituée par les 2 fils de l'antenne et le retour par la terre. Le parcours du courant  $I_E$  dans les 2 fils de l'antenne en surface est bien défini, par contre le retour par la terre suit un parcours mal défini sous l'émetteur. Sur la Figure 5, la ligne médiane (1) passe dans le plan vertical  $xOz$ , mais il existe aussi des lignes (2) et (3) qui passent sous terre en avant ou en arrière de cette ligne médiane.

Comme le retour de courant par le sol ne se fait qu'en dessous de l'émetteur, le moment magnétique  $\mathcal{M}_E$  est orienté horizontalement, dans la direction perpendiculaire à l'axe des antennes (Figure 5).



*Figure 5 : Boucles de courant dans la terre quand l'émetteur est en surface. La ligne de courant médiane est dans le plan vertical (les lignes de courant en avant ou en arrière de cette ligne médiane n'ont été dessinées qu'à moitié pour la clarté du schéma). Le moment magnétique  $\mathcal{M}_E$  est orienté horizontalement, dans la direction perpendiculaire à l'axe des antennes*

Comme le moment magnétique  $\mathcal{M}_E$  est horizontal, le couplage avec la spire du récepteur est du type **antiparallèle** avec le sous-sol. Il faut que la spire dans le sol soit dans le même plan  $xOz$  que l'émetteur pour avoir un bon couplage. On est dans la configuration de Gauss de type B (Figure 4-B). Il faut que la spire du fond soit elle aussi orientée horizontalement selon  $Oy$ .

Nous venons de voir le cas où l'émetteur est en surface et le récepteur au fond. En fait les 2 spires ont des rôles symétriques et interchangeables. Mais c'est plus facile de comprendre les directions des moments magnétiques en partant de la surface car c'est le cas le plus facile à comprendre.

## Cas de l'émetteur au fond

Pour l'émetteur du fond, il faut que l'antenne soit orientée parallèlement à celle de l'émetteur en surface, c'est-à-dire que les spires médianes soient dans le même plan. En pratique, comme l'antenne de surface est plus facile à orienter que celle du fond, il faut orienter l'antenne en surface parallèlement à celle du fond. La boucle électrique de la spire du fond est constituée par les 2 fils de l'antenne et le retour par la terre. Le parcours du courant  $I_E$  dans les 2 fils de l'antenne est bien défini, par contre le retour par le sol suit un parcours mal défini à la fois au-dessus et en dessous de l'émetteur.

Il existe de nombreuses configurations en fonction de la topologie du terrain.

-- Dans une grande salle, en se plaçant au milieu de cette grande salle, on peut avoir une configuration proche de celle de l'émetteur de surface, avec des courants qui passent en dessous donnant un moment magnétique à peu près horizontal et un bon couplage.

-- Par contre dans un boyau étroit, le courant de bouclage dans le sol passe tout aussi bien au-dessus de l'antenne qu'en dessous. Le courant de bouclage au-dessus de l'antenne peut être aussi important que le courant en dessous. Attention, le moment magnétique global peut être pratiquement nul par compensation des moments magnétiques au-dessus et en dessous de l'antenne.

La Figure 6 montre la boucle inférieure de courant dans le sol qui produit le moment magnétique  $\mathcal{M}_1$  et la boucle supérieure qui donne le moment magnétique  $\mathcal{M}_2$ . Ces 2 moments magnétiques sont opposés et leur résultante  $\mathcal{M} = \mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2$  peut donner un moment magnétique assez réduit. Par simplification de la représentation, la circulation de ces courants a été présentée dans le plan vertical xOz sur la Figure 6 ; en pratique elle existe tout autour des 2 fils d'antenne mais cela ne change pas le résultat, donnant un moment magnétique assez réduit

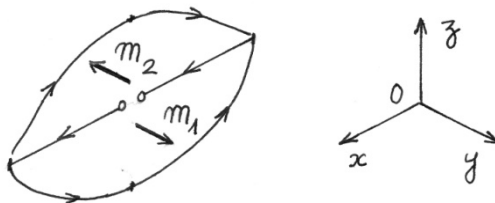


Figure 6 : retour des courants en sous-sol.

*Le schéma a été simplifié à la circulation des courants dans le plan vertical*

**Cette analyse montre clairement qu'en profondeur, il faut éviter de placer l'antenne dans un boyau étroit où le courant de retour par le sol peut se refermer de toutes parts. Il est préférable d'utiliser une cavité assez large et de se positionner à peu près au milieu, de telle façon que les courants de bouclage se referment préférentiellement en dessous de l'antenne.**

**Pour avoir le fonctionnement optimal, il faut aussi trouver un emplacement où les courants électriques peuvent se refermer en profondeur sous l'antenne, c'est-à-dire un endroit où la couche conductrice est assez épaisse (au minimum de plusieurs mètres). C'est tout aussi valable pour l'antenne de surface que pour l'antenne du fond.**



## Les « Molephones »

Avant le développement du « système Nicola », les « Molephones » permettaient de faire des transmissions sous terre pour les secours spéléo. L'antenne de ces Molephone est une bobine comportant une dizaine de spires déployée par un cadre donnant une surface supérieure au mètre carré (Figure 7). Cette antenne ou cette bobine se pose à plat sur le sol. Les Molephone fonctionnent eux aussi autour de 80 kHz. Avec le Molephone, la transmission fonctionne par couplage magnétique entre les 2 antennes. C'est un très bon exemple de transmission par champ magnétique.

Une des différences avec les systèmes de Transmission Par le Sol, c'est l'orientation du moment magnétique qui est en principe verticale pour les Molephone. Le couplage est maximum quand les 2 moments magnétiques, celui de l'émetteur et celui du récepteur sont alignés (cas le plus favorable de l'étude théorique).

Le Molephone est très peu sensible à la variation de conductivité du sol. C'est un dispositif qui peut être très utile pour rechercher la correspondance entre une position sous terre et une position en surface par exemple.

Ce Molephone a été supplanté par le système Nicola pour les transmissions parce que la portée de ce dernier est plus grande. En plus, emporter sous terre 2 fois 30 m de fil est plus facile que de transporter l'antenne du Molephone.

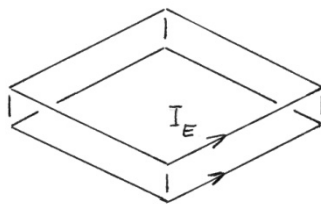


Figure 7 : Antenne du Molephone

## La transmission par courant électrique dans le sol

Le mode que nous venons de voir fonctionne par induction, mais il existe un autre mode : la transmission par conduction. Le courant électrique envoyé par l'émetteur dans le sol se referme par des lignes de courant à l'intérieur du sol. En considérant que l'antenne de réception est un système qui permet de mesurer une différence de potentiel entre les 2 extrémités de l'antenne, il est possible de mesurer une tension aux bornes de l'antenne.

Le calcul est plus complexe que pour le champ magnétique. Le seul cas simple est celui d'un milieu homogène en 3D (3 dimensions). Quand on dit homogène, cela revient à supposer que le milieu n'est pas constitué d'une succession de couches plus au moins conductrices, mais d'un seul matériau parfaitement isotrope, qui présente les mêmes propriétés dans toutes les directions (c'est très théorique).

Le calcul peut alors être effectué par le courant électrique qui sort des extrémités de l'antenne et qui se referme par le sol. Ce courant va se refermer tout autour de l'antenne par des lignes de courant électrique dont la densité est de plus en plus réduite quand on s'éloigne de l'émetteur. Le schéma des lignes de courant ressemble à celui des lignes de champ magnétique (Figure 4-A).

A partir de l'intensité locale de la densité de courant, on peut calculer la tension maximale entre les 2 extrémités de l'antenne. Nous sauterons les calculs intermédiaires et nous ne donnerons que le résultat dans une seule position, celle où les 2 antennes sont horizontales et placées parallèlement l'une en dessous de l'autre à assez grande distance.

Si  $I_E$  est le courant qui sort de l'extrémité de l'antenne émettrice de longueur «  $2\ell$  », si l'antenne réceptrice placée à la distance «  $r$  » est elle-aussi de longueur «  $2\ell$  » (Figure 8), et si «  $\rho$  » est la résistivité du sol, la tension maximale «  $\Delta V$  » mesurée par l'antenne est donnée par :

$$\Delta V = (1/4\pi) \cdot (\rho \cdot I_E) \cdot ((2\ell)^2 / r^3)$$

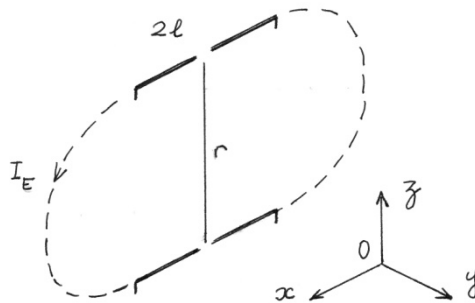


Figure 8 : Transmission par courant électrique

Pour une distance  $r = 400$  m, des antennes de  $2\ell = 30$  m, une résistivité du sol de  $\rho = 1000 \Omega \text{ m}$ , on obtient une tension  $\Delta V$  de l'ordre de  $0,1$  mV. En 3D isotrope, le signal reçu est du même ordre de grandeur (une fraction de millivolt) que pour la transmission par champ magnétique.

Alors le système TPS fonctionne-t-il par transmission par courant électrique ou par champ magnétique ? Est-ce un fonctionnement par induction ou par conduction ?

### Les limitations importantes de la transmission par courant électrique entre la surface et le fond

Le sous-sol est très loin d'être homogène. Si on a une couche plus conductrice et une qui l'est moins, la couche conductrice va faciliter le passage des lignes de courant et court-circuiter le passage de ces lignes dans la couche moins conductrice, qui va être pratiquement isolée. De plus la moindre fracture dans la roche va constituer une zone isolante et empêcher la circulation des lignes de courant électrique. Il est important de comprendre que toutes ces non-homogénéités concourent à réduire très notablement la portée de la circulation des micro-courants électriques à grande distance.

L'activité spéléologique se pratique la plupart du temps dans un sous-sol calcaire. Ce calcaire est une roche sédimentaire, constituée par le dépôt de couches successives. Ces couches ont été bousculées (et même basculées) par les mouvements du sol, mais leur conductivité reste anisotrope. Ces couches sont appelées Urgonien, Sénonien, pouvant être séparés par de l'Albien par exemple ...

Verticalement, à cause de ce milieu anisotrope, atteindre une portée pratique de plusieurs centaines de mètres en transmission par conduction sous terre est très difficile.

### **Transmission planaire par courant électrique**

Cependant, des couches de terrain plus conductrices peuvent jouer un rôle important en transmission planaire par conduction. C'est-à-dire que les lignes de courant restent contenues dans le plan de cette couche en 2D au lieu de se disperser en 3D. Cette transmission en 2D permet de réduire la dilution des lignes de courant et d'atteindre des portées plus importantes.

Par exemple avec une couche superficielle de terre (résistivité de l'ordre de 30  $\Omega\text{m}$  par exemple) au dessus d'une couche de calcaire (résistivité de l'ordre de 1000  $\Omega\text{m}$  par exemple), les lignes de courant vont se répartir dans cette couche plus conductrice. C'est une distribution planaire au lieu d'être volumique. Dans ce cas là, la tension mesurée  $\Delta V$  est donnée par l'expression approximative suivante :

$$\Delta V \approx (1/2\pi) \cdot (\rho \cdot I_E / p) \cdot ((2 \ell)^2 / r^2)$$

Pour une sensibilité comparable aux exemples précédents, on obtient une portée théorique de l'ordre de 5 à 10 km si les lignes de courant électrique restent en 2D.

En transmission par conduction, la transmission planaire d'une part et la limitation de la transmission verticale d'autre part proviennent du même phénomène de propagation orientée dans le sol, lié à l'anisotropie de la résistance du sol. Les lignes de courant qui se propagent principalement dans les couches plus conductrices sont responsables à la fois de la difficulté de transmission verticale entre la surface et le fond, mais aussi des possibilités de faire des liaisons avec une portée très notable dans une couche.

### **Comparaison entre la transmission par induction et par conduction**

Dans le cas de la transmission par courant électrique, les tensions mesurées sont créées par des courants infimes à plusieurs centaines de mètres de l'antenne. C'est très différent pour la transmission par champ magnétique où la circulation des courants dans le sol s'effectue principalement à faible distance de l'antenne. Si l'antenne a une longueur totale de  $2 \ell$ , au moins les 2/3 du courant dans le sol passe dans une épaisseur de  $\ell/2$ . C'est-à-dire pour une antenne qui fait 2 fois 30 mètres de longueur, les 2/3 des lignes de courant passent dans une épaisseur de moins de 15 mètres. Les deux types de transmission (par champ magnétique et par courant électrique) utilisent le même réseau de lignes de courant, mais le champ magnétique est créé par les lignes de courant importantes à proximité de l'antenne, alors que la transmission par courant électrique utilise les micro-courants à grande distance, quand ils subsistent encore.

La transmission par champ magnétique est pratiquement insensible aux variations de propriétés physiques du milieu traversé, ce qui la rend prévisible et relativement fiable. Au contraire la transmission par conduction peut être entravée par des conditions non connues dans le milieu traversé, ou bien inversement bénéficier de conditions 2D favorables ...

Le signal mesuré est différent. Dans le cas de la transmission par courant électrique, le signal mesuré est directement proportionnel au courant injecté. Il ne dépend pas de la fréquence. Par contre dans le cas de la transmission par champ magnétique, la tension mesurée est proportionnelle à la fréquence, et elle est déphasée de  $\pi/2$  par rapport au courant.

Ce qui fait que la transmission par courant électrique peut fonctionner un peu mieux à basse fréquence, mais que la transmission par champ magnétique fonctionnera toujours mieux à plus haute fréquence. Et si on veut vérifier expérimentalement si on est en transmission par induction ou par conduction, il suffit de mesurer ce déphasage ...

Il pourrait arriver que les 2 modes soient reçus simultanément, en particulier à courte distance. Dans ce cas là le récepteur va recevoir les 2 signaux déphasés avec la même modulation. La qualité du signal démodulé pourrait s'en ressentir, mais la transmission devrait toujours fonctionner.

Pour conclure sur cette comparaison entre les 2 systèmes, la transmission par courant électrique est très pénalisée par des inhomogénéités du sol, alors que la transmission par champ magnétique est insensible à la variation des propriétés des couches intermédiaires. Ce qui fait que cette transmission par champ magnétique est prépondérante entre le fond et la surface à une certaine distance. Mais il existe des cas où l'anisotropie du sol peut donner une transmission planaire des courants électriques donnant une portée plus grande à ce type de transmission

Pour l'émetteur – récepteur, c'est-à-dire pour la partie entre les 2 antennes, le type de transmission ne change rien. C'est au niveau des antennes et de leur placement que se fait la différence.

## Un exemple pratique

La nature des éléments en surface et en profondeur sont d'une telle diversité qu'on peut rencontrer de très nombreux cas. Nous allons juste prendre un cas relativement simple :

- en surface un terrain relativement conducteur avec une couche superficielle de terre au dessus d'une couche de calcaire de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.
- au fond à 400 mètres sous terre, à la verticale du point en surface, on trouve une couche de marne entre deux couches calcaires.

Pour avoir la meilleure portée possible, il faut placer l'émetteur en surface dans un endroit où les courants électriques en dessous de l'antenne vont pouvoir se développer. Il faut choisir un endroit où la couche conductrice est aussi épaisse que possible pour augmenter la surface embrassée par ces courants et maximiser le moment magnétique.

Pour l'émetteur du fond, il faut le placer dans un endroit où les courants électriques en dessous de l'antenne vont pouvoir se développer. Attention aux courants latéraux et au dessus de l'antenne. Il faut se placer sur le sol d'une salle assez large. Là encore il faut choisir un endroit où la couche conductrice est aussi épaisse que possible pour augmenter la surface embrassée par ces courants et maximiser le moment magnétique.

En surface il faut orienter l'antenne parallèlement à celle du fond

Si toutes ces conditions sont réunies, la **transmission par champ magnétique** devrait fonctionner de façon optimale.

Comme nous venons de le voir sur cet exemple, la transmission par courants électriques entre la surface et le fond ne peut pas fonctionner très loin dans un milieu avec des couches à faible et à forte résistivité. Entre la surface et le fond, c'est la **transmission par champ magnétique** qui fonctionne mieux à une certaine distance. Cependant dans une même couche, il peut arriver que la transmission planaire permette la **communication par conduction** à une distance plus grande que celle de la transmission par champ magnétique.

### **Et la suite ...**

Les progrès récents dans les capteurs de champ magnétique permettraient d'apporter des améliorations très notables en réception [4, 5, 6]. Pour détecter un champ magnétique, on peut utiliser des capteurs très sensibles comme les capteurs GMI (Geant Magneto Impedance). Les niveaux de bruit atteints sont si faibles qu'on envisage de les utiliser dans les systèmes RMN. On commence à voir des études scientifiques de transmissions sous-marines et sous-terraines avec ces capteurs GMI à quelques dizaines de kilohertz. Pour notre système TPS, chaque émetteur – récepteur pourrait avoir une spire pour l'émission et un capteur de champ magnétique GMI pour la réception. Ces capteurs GMI font actuellement l'objet de recherches importantes (en particulier à Grenoble INP [5]), mais il n'existe que peu de réalisations industrielles pour le moment.

Nous n'avons abordé que le couplage entre l'émetteur et le récepteur, l'équivalent de la porteuse en onde radio. Actuellement la modulation de ce champ magnétique est faite en BLU. Des modulations plus avancées, bien adaptées au faible rapport signal sur bruit, peuvent être envisagées. Cependant il ne faut pas oublier que les conditions sous terre ne permettent pas d'embarquer du matériel informatique performant.

### **Synthèse**

Cette analyse théorique des systèmes de « Transmission Par le Sol » montrent d'abord que nous ne sommes pas dans un cas de transmission radio, mais dans un couplage magnétique entre la spire émettrice et la spire réceptrice. Ces spires sont constituées des 2 fils d'antenne et du retour par le sol.

Les moments magnétiques de ces spires sont horizontaux et des 2 antennes (celle de surface et celle du fond) doivent être dans le même plan vertical. On les appelle des antennes, mais il ne faut pas les voir comme des antennes de radiocommunication ; ce sont des morceaux des 2 boucles en interaction permettant une transmission par champ magnétique.

Il faut éviter à tout prix de placer l'antenne du fond dans un boyau étroit. Les courants de retour par le sol risquent de donner un moment magnétique très réduit. Il est préférable de placer l'antenne au fond d'une salle assez large.

La transmission 3D par courant électrique peut difficilement fonctionner entre la surface et le fond à cause de la nature non-homogène de la conductivité du sous-sol. Cependant nous avons mis en évidence que pour le cas particulier d'une couche conductrice, on pouvait avoir une transmission 2D par conduction avec une portée assez grande.

Cette analyse a pour objectif de faire mieux comprendre le fonctionnement des transmissions par le sol. Cette meilleure compréhension permet de guider l'utilisateur pour optimiser le fonctionnement. Par exemple les antennes doivent être positionnées par rapport au sol pour maximiser le moment magnétique et non par rapport à son rayonnement comme une antenne radio classique. La conduction planaire peut aussi être recherchée. Il faut bien comprendre ces notions pour optimiser le fonctionnement des « Transmissions Par le Sol ».

## Remerciements

Il serait trop long de citer tous ceux qui ont eu une contribution majeure dans le développement de ces systèmes TPS pour les secours spéléo. Nous ne mentionnerons que le CREG pour le Molephone, Jean-Jacques Fauchez F6IDE(SK) / ADRASEC38 pour les nombreux prototypes, la Fondation Nicola pour son aide financière, Paul Mackrill et Graham Naylor pour le développement du Système Nicola.

## Références

- [1] Système de transmission par le sol  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Système\\_de\\_transmission\\_par\\_le\\_sol](https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_de_transmission_par_le_sol)
- [2] M. Rossignol and J-P. Yonnet, Chap "Permanent magnets" of the book "MAGNETISM", t.1 "Fundamentals", t.2 : "Materials and Applications", Springer (USA), 2005, ISBN 0-387-23000-9, p 3 – 88
- [3] J-P. Yonnet, "Calcul des systèmes à aimants permanents", Les Référentiels DUNOD, Pratique des Matériaux Industriels, ISBN 2 04 020150 5, Chap. 9-11, 29 p., février 2001
- [4] Maurice Hott, Peter A. Hoehner and Sebastian F. Reinecke, "Magnetic Communication Using High-Sensitivity Magnetic Field Detectors", Sensors 2019, 19, 3415 (14p) ; doi:10.3390/s19153415
- [5] Papa Silly Traore, Aktham Asfour, Jean-Paul Yonnet and Cédric Boudinet, "Introduction of real-time digital processing techniques for the high-sensitivity GMI sensors", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 59(9):1-9, November 2018, DOI: 10.3233/JAE-171214
- [6] Jang-Yeol Kim *et al.*, "A Novel Experimental Approach to the Applicability of High-Sensitivity Giant Magneto-Impedance Sensors in Magnetic Field Communication", à paraître dans IEEE Transactions on Magnetics, 2020