

Fonctionnement d'un téléphone mobile sous l'eau

É. Carry, J.-M Friedt, 4 août 2020

1 Introduction

Parmi les idioties que nous lisons quotidiennement dans la presse grand public, la technologie, et les liaisons radiofréquences en particulier, est souvent en haut du palmarès faute de compétence des auteurs et du moindre esprit critique sur leurs affirmations, sans néanmoins atteindre le niveau des statistiques qui sont l'apothéose de l'art de cacher le mensonge [1].

Notre attention a récemment été attirée par l'annonce brève de 20-Minutes [2], journal à grand tirage consulté par nombre de parisiens dans leur trajet en transport public – annoncé être survolé par près 4 millions de lecteurs chaque jour d'après leurs propres mesures.

L'article de ce journal analyse la capacité d'un téléphone immergé dans l'eau à communiquer avec son environnement par "les experts sont formels : c'est impossible. Un mobile ayant été éclaboussé "peut encore fonctionner, par contre s'il est immergé dans l'eau, c'est non, affirme notre spécialiste. Même plongé dans 10 centimètres d'eau, les fréquences radiotéléphoniques ne passent plus, c'est fini. Même si le téléphone peut continuer de fonctionner un certain temps, s'il est plus ou moins imperméable, il est impossible en revanche qu'il émette quoi que ce soit." " Si le spécialiste [3] l'a dit, c'est que c'est sûrement vrai. Ou pas ...

Le problème des spécialistes, c'est qu'ils le sont dans leur domaine restreint, qui clairement ici n'inclut par la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques faiblement conducteurs qu'est une eau douce de fleuve. Étant donné que nombre de nos collègues font des mesures de RADAR de sol (*Ground Penetrating RADAR* – GPR) en milieu lacustre [4], nous pouvons nous interroger sur la véracité de telles informations.

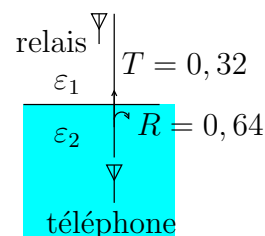


Figure 1: Définition des notations utilisées dans le texte.

2 Analyse du problème

Le calcul du bilan de liaison en GPR depuis une antenne en surface d'une onde rencontrant plusieurs interfaces diélectriques (réelle ou complexe par variation de permittivité relative ou de conductivité) est classique et fait intervenir :

1. la réflexion de l'onde qui rencontre une interface entre deux diélectriques de permittivité relative ε_1 et ε_2 (Fig. 1). Tout changement de vitesse d'une onde se traduit par un coefficient de réflexion R et de transmission T , dont la somme par conservation de l'énergie est égale à 1 (attention : nous parlons de réflexion et transmission en puissance et non en tension, grandeur que nous traitons habituellement en radiofréquence)

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \Rightarrow T = 1 - R$$

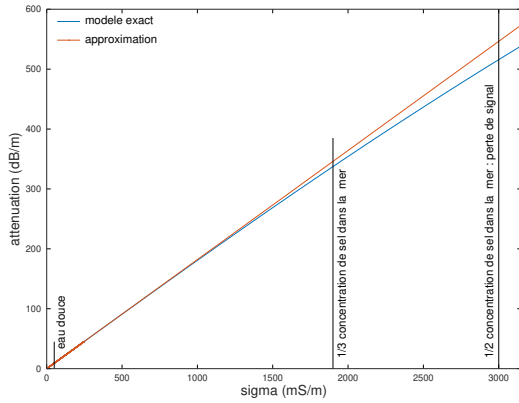
avec $n_i = \sqrt{\varepsilon_i}$ l'indice optique du milieu (i.e. le rapport de la vitesse de l'onde dans le vide à sa vitesse dans le milieu)

2. les pertes de propagation par conductivité dans le milieu. Notées α , ces pertes [5] sont liées aux mouvements ioniques accompagnant la propagation de l'onde dans un milieu de conductivité σ non-nulle

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r' \varepsilon_0} \right)^2} - 1 \right)}$$

avec $\varepsilon_r = \varepsilon_r' + j\varepsilon_r''$ la permittivité relative (complexe avec $\varepsilon_r'' = \sigma/\omega$), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ la perméabilité magnétique du vide, ε_0 la constante diélectrique du vide (pour rapport $\varepsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ avec c la vitesse de la lumière dans le vide) et $\omega = 2\pi f$ la pulsation angulaire d'une onde de fréquence f .

Cette expression fort peu sympathique de l'atténuation – qui étant une décroissance exponentielle, se traduit immédiatement en dB/m – on se référera à [6] pour la définition du bel, du décibel et de son



```

1 f=900e6           % frequency (Hz)
2 er=81            % water (no unit)
3 sigma=5e-2       % conductivity (S/m)
4 e0=8.85e-12;    % \epsilon_0
5 mu0=4*pi*1e-7;  % \mu_0
6 sigma=[0:1e-5:0.25 0.25:.1:3];
7
8 w=2*pi*f;
9 eps1=er*e0;     % real permittivity
10 eps2=sigma/w;  % imag permittivity
11 A1=sigma/2*sqrt(mu0/eps1); % ~ if sigma small
12 A2=w*sqrt(mu0*eps1/2*(sqrt(1+eps2.^2/eps1^2)-1));
13 plot(1000*sigma,8.7*A2)

```

FIGURE 2 – Gauche : évolution de l’atténuation de l’onde (en decibels/m, donc une échelle logarithmique en ordonnée) en fonction de la conductivité du milieu. Les trois lignes verticales représentent le cas de l’eau douce, 50 mS/m, la conductivité de 1,9 S/m pour laquelle le signal du téléphone est encore exploitable, et 3 S/m la conductivité pour laquelle le signal a été perdu lorsque le téléphone est immergé sous 8 cm de liquide, correspondant environ à la moitié de la salinité de la mer. Droite : le code GNU/Octave ayant servi à tracer ces courbes.

application à une grandeur avec une unité telle que la puissance – si on multiplie par $20 \log_{10}(e) = 8,68$ (20 pour la mise au carré lors du passage de l’atténuation en tension vers une atténuation en puissance) – se simplifie dans le cas des milieux faiblement conducteurs [7]. En effet en considérant $\sigma \rightarrow 0$, nous prenons le développement de Taylor au premier ordre de $\sqrt{1+x} = (1+x)^{1/2}$ quand $x \rightarrow 0$ qui vaut à peu près $1 + \frac{x}{2}$ et donc

$$\alpha \simeq \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}{2} \left(1 + \frac{\sigma^2}{2\omega^2 (\epsilon_0 \epsilon_r')^2} - 1 \right)} = \omega \sqrt{\frac{1}{4} \frac{\mu_0 \sigma^2}{\omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r'}}$$

Mettons ces considérations (Fig. 2) en pratique sur une liaison 3G (UMTS) que nous supposons transmettre à $f = 900$ MHz. Nous apprenons [8] qu’un téléphone répondant à ces normes peut émettre jusqu’à 21 dBm (126 mW) et sa limite de réception est de -135 dBm (30 aW), soit près de 150 dB de dynamique sur un bilan de liaison radiofréquence. Qu’en est-il donc de plonger ce téléphone dans l’eau douce ?

1. l’eau est de très haute permittivité grâce aux liaisons hydrogènes entre ses molécules et le passage de l’air ($\epsilon_1 = 1$) à l’eau ($\epsilon_2 = 81$) se traduit par un fort coefficient de réflexion en puissance de 0,64 = -2 dB soit un coefficient de transmission de 0,36 = -4,4 dB. Nous avons donc perdu 4,4 dB de la tour qui communique avec le téléphone et 4,4 dB du téléphone qui répond. Cependant ces deux contributions ne se somment pas comme ce serait le cas en GPR qui illumine une cible passive, le téléphone étant une source active.
2. l’eau douce présente une conductivité typique de 50 mS/m soit des pertes de propagation de l’ordre de 1 dB/m. Même en traversant 3,6 m d’eau, l’onde n’est atténuée que de 3,6 dB additionnels.

Quelle conclusion sur le bilan de liaison ? Selon l’équation de Friis, les pertes L entre un émetteur à fréquence f et un récepteur à distance d est

$$L = 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f - 147,55$$

soit à 900 MHz une application numérique qui indique $20 \log_{10} d = 31,5$ dB. La conséquence d’abaisser le bilan de liaison de 3,6+4,4=8 dB est de réduire la portée de la liaison d d’un facteur $10^{8/20} = 2,5$.

Ainsi, loin de “impossible en revanche qu’il émette quoi que ce soit”, nous avons simplement perdu un peu en portée. On pourra argumenter que le milieu de forte permittivité a désaccordé l’antenne qui a perdu en efficacité et ne rayonne plus bien. Pour une antenne conçue pour fonctionner avec un appareil collé à un crâne – i.e un vase plein d’eau – c’est un argumentaire douteux.

3 Expérience

Toutes ces équations pour démontrer un bilan de liaison réaliste entre un téléphone immergé dans de l'eau modérément conductrice et une tour relais ne sauraient convaincre l'ignorant lecteur de 20-Minutes. Nous allons donc étoffer notre argumentaire avec une analyse expérimentale (Fig. 3).

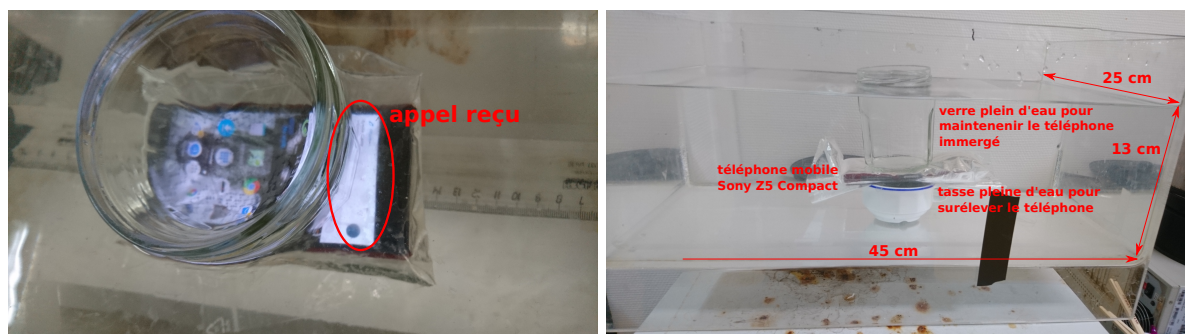


FIGURE 3 – Montage expérimental pour tester la liaison radiofréquence entre une tour relais et un téléphone mobile immergé. À gauche, un appel est reçu malgré l’immersion, ici dans l’eau du robinet sans ajout de sel.

Un bocal de $25 \times 13 \times 45 \text{ cm}^3$ est rempli d’eau du robinet, conductivité typique de l’ordre de 5 à 50 mS/m que nous n’avons pas les moyens de mesurer. Un téléphone mobile Sony Z5 protégé par deux sacs étanches au plus proche du dispositif y est inséré. Afin de ne pas permettre à l’onde de se propager par la couche d’air sous le bocal, le téléphone est surélevé par un support diélectrique rempli d’eau (i.e. une tasse), et maintenu sous l’eau par un second récipient lui aussi rempli de la même eau que le bocal. La lame d’eau entre le téléphone et la surface est de 8 cm – proche des 10 cm annoncés dans l’article – et l’épaisseur d’eau entre le bord de l’aquarium et le bord le plus proche du téléphone est 9 cm. Alors que ces dimensions peuvent paraître faibles face à la longueur d’onde dans l’air d’un signal électromagnétique centré sur 900 MHz – $\frac{300}{900} = 30 \text{ cm}$ – on se rappellera que ici l’onde se propage dans un diélectrique de permittivité relative ϵ_r donc de longueur réduite de $\sqrt{\epsilon_r}$. Les 30 cm réduits d’un facteur 9 sont commensurables avec les distances que nous venons de citer : le téléphone est entouré d’un volume d’eau dont la dimension dans chaque direction est de l’ordre de quelques longueurs d’onde et les effets de bords sont considérés comme négligeables.

L’expérience consiste à appeler le numéro du téléphone dans l’eau et constater qu’un appel est reçu tel qu’annoncé sur l’écran (Fig. 3, gauche). Constat expérimental : aucun problème pour communiquer avec le téléphone immergé dans l’eau douce. Ce résultat est en accord avec nos attentes : une réflexion de 4,4 dB à l’interface eau-air ne doit pas interdire la communication.

Name	Formula	0.5%	1%	2%	3,5%	5%
Sodium chloride	NaCl	8.2	16.0	30.2	≈ 50	70.1

TABLE 1 – Relation entre concentration massique de sel dans l’eau et conductivité en mS/cm (diviser par 10 pour obtenir des S/m), extrait de [9]. La colonne en rouge est un ajout de notre part pour illustrer le cas de l’eau de mer (35 g/l ou 3,5% en masse).

Le sujet de l’article étant Nantes, dans l’embouchure de la Loire, nous pouvons supposer que le journaliste a tronqué son interview avec “le spécialiste” et a omis de mentionner que la mer remonte et augmente la conductivité de l’eau. Nous avons donc poursuivi l’expérience en insérant, par pas de 26 g, du sel (de mer) dans le volume de 14,6 l d’eau dans l’aquarium, soient des pas de 1/20 de la salinité de l’Océan Atlantique. La liaison avec le téléphone a été maintenue de 1/20 à 7/20 de la salinité de la mer, et a été perdue lors de l’ajout de la quantité de sel nécessaire pour atteindre 1/2 de la salinité de la mer.

Avec une telle concentration de sel de 20 g/l (2% massique), la conductivité de l’eau atteint environ 3,0 S/m d’après [9]. L’équation fournie plus haut indique que pour une telle conductivité, l’atténuation est de l’ordre de 500 dB/m (l’approximation de faible conductivité étant moins bien vérifiée) ou environ

40 dB d'atténuation sur 8 cm d'eau (soit une perte de 10^4 sur la puissance reçue par rapport à une propagation dans l'eau douce).

Pour les 7/20 de la concentration de sel dans la mer pour lesquels la liaison est encore opérationnelle, ou 12 g/l soit 1,2% massique, la conductivité est environ 1,9 S/m et l'atténuation correspondante est 340 dB/m ou 27 dB/8 cm, soit près d'un facteur 1000 d'atténuation sur la puissance reçue par rapport à une propagation en eau douce. La conductivité ionique a donc un impact catastrophique sur le bilan de liaison, avec des pertes tabulées à 1000 dB/m dans la mer à 1 GHz – effet bien connu en GPR avec l'impossibilité de toute mesure dans l'argile.

Finalement, ne connaissant pas l'impact de la marée aussi loin dans les terres, nous avons consulté la base de données SYVEL (GIP Loire Estuaire) à <http://www.loire-estuaire.org/accueil/nos-outils/reseau-de-mesures-en-continu-syvel-2> qui observe divers paramètres physico-chimiques du fleuve à son embouchure, et en particulier aux stations de Trentemoult (aval de Nantes) et Bellevue (amont de Nantes). Pour la période de Juillet 2020, la conductivité ne dépasse jamais les 0,4 mS/cm (ou 40 mS/m) qui reste dans la gamme qualifiée d'eau douce, correspondant à des concentrations de quelques dizaines de mg/l de sel dans l'eau [10, p.5]. On notera que les unités de mS/cm et g/l de sel dans l'eau tendent à confusion car les valeurs numériques sont proches, 35 g/l de sel correspondant à 5 S/m ou 50 mS/cm, donc 0,35 g/l de sel dans l'eau correspondent environ à 0,5 mS/cm de conductivité.

4 Analyse

Cet article n'a pas forcément vocation à démontrer une fois de plus l'incapacité d'analyse de l'information des journalistes, mais de sensibiliser le lecteur aux possibilités et impossibilités de la physique :

- un milieu diélectrique, que ce soit l'air, l'eau douce ou le sable, ne fait que ralentir une onde électromagnétique mais n'aura aucun impact sur la puissance propagée à une certaine distance. Lorsque nous plaquons des antennes GPR contre le sol, c'est pour empêcher la double réflexion de l'onde aux interfaces air-sol et sol-air, mais une fois que l'onde a couplé avec le sol, elle s'y propage aussi heureuse que dans l'air, simplement $\sqrt{\epsilon_r}$ plus lentement. Il est ainsi démontré en environnements secs des propagations sur plusieurs centaines de mètres aux fréquences VHF, par exemple dans les dômes de sel pré-sentis en Allemagne pour le stockage de déchets nucléaires [12], ou en antarctique lors de la mesure de l'épaisseur de la calotte glaciaire [13],
- à l'opposé du spectre, il est simplement impossible de propager une onde électromagnétique dans l'eau de mer. Entre les producteurs de pétrole qui veulent absolument mettre des capteurs communiquant par onde électromagnétique dans leurs plateformes en mer du Nord et les plongeurs qui veulent se localiser sous l'eau conductrice, c'est peine perdue (nous avons eu affaire aux deux). Le GPS à 1,57542 GHz a déjà du mal à traverser un épais feuillage, que dire d'une eau atténuant de plus de 1000 dB/m.

Compte tenu de l'atténuation qui a induit la perte de signal d'environ 29 dB, et de l'atténuation de 1 dB/m par l'eau douce, nous en déduisons que le téléphone doit continuer à communiquer par une profondeur de plus de 20 m d'eau douce. Nous n'avons pas pu valider ce point expérimentalement.

Concluons sur les liaisons sous-marines militaires qui communiquent en très basse fréquence – celles que nous pouvons recevoir avec la carte son de nos ordinateurs personnels. En reprenant les calculs ci-dessus, certes une onde électromagnétique s'atténue rapidement dans un milieu conducteur, mais en partant d'une onde qui fait 30 km de longueur d'onde (par exemple à 10 kHz), on arrivera toujours à faire parvenir un peu de signal à quelques dizaines de mètres sous l'eau. Le débit est certes faible, l'infrastructure certes immense, mais ce mode de communication avec les sous marins à travers le monde est largement déployé, par exemple avec les stations de Rosnay, Saint Assise et La Régine en France qui perturbe nos analyses des transmissions anglaises de MSF à 60 kHz.

L'alternative en sous-marin est évidemment la liaison acoustique, avec tous les problèmes induits de variation de célérité du son dans les milieux hétérogènes, de cavitation et d'interférence des mammifères sous-marins. Un changement de paradigme est proposé par le MIT (évidemment) qui propose de propager une onde acoustique du sous-marin à la surface et de détecter les vibrations de la surface de l'eau par RADAR [14] : bien qu'audacieuse, l'utilisation pratique de cette idée en conditions de mer houleuse semble douteuse.

5 Conclusion

Tellement de bêtises circulent sur les communications radiofréquences [15] que nous désirons au moins parfois rectifier les grossières erreurs lues dans les journaux grand public. Ici, une affirmation erronée concernant la propagation des ondes radiofréquences dans l'eau douce a été l'occasion d'aborder l'impact de la conductivité du milieu dans lequel ces ondes se propagent, pour conclure par l'impossibilité de faire pénétrer une onde électromagnétique dans la mer. Au contraire, l'impact de l'eau douce se limite à ralentir l'onde, avec un effet atténuateur négligeable.

Pouvons nous extrapoler notre conclusion sur les media aux autres sujets que nous ne maîtrisons pas ? Ne connaissant absolument rien à la médecine, quelle confiance faire aux politiciens et journalistes qui nous abreuvent chaque jour/semaine/mois d'informations contradictoires sur la protection contre les virus ? Combien de personnes sont compétentes pour juger des relations sino-européennes ou américano-russes dans un contexte de propagande et de désinformation ? Contentons nous de discuter des sujets sur lesquels nous pouvons refaire sereinement les démonstrations expérimentales et retrouver les lois de comportement selon un raisonnement rationnel, la physique est déjà assez compliquée pour ne pas aborder les domaines irrationnels. Tel que l'exprimait Rage Against the Machine, "If ignorance is bliss, Then knock the smile off my face".

Remerciements

H. Fallou du réseau de mesures SYVEL a gracieusement fourni les données de conductivité de la Loire à Nantes et échangé sur leur interprétation. Toutes les références bibliographiques qui ne sont pas librement disponibles sur le web ont été acquises auprès de Library Genesis à gen.lib.rus.ec, une ressource indispensable à nos recherches.

Références

- [1] J. Klatzmann, *Attention, statistiques! Comment en déjouer les pièges*, La Découverte Ed. (1996)
- [2] <https://www.20minutes.fr/societe/2805971-20200623-affaire-steve-maia-canico-telephone-peut-borner-fois-immerge-comme-avance-syndicat-police>
- [3] *The Expert*, <https://www.youtube.com/watch?v=BKorP55Aqvg> (consulté Juillet 2020)
- [4] M. Dabas, C. Camerlynck, G. Bossuet, P. Pétrequin, M. Bailly, *Détection par méthode radar de niveaux anthropiques du Néolithique final sous le niveau actuel du lac de Chalain (France)*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science **328**(8), pp.509–514 (1999) à https://www.researchgate.net/publication/248521206_Detection_par_methode_radar_de_niveaux_anthropiques_du_Neolithique_final_sous_le_niveau_actuel_du_lac_de_Chalain_France. Le lecteur désireux d'admirer C. Camerlynck en action pourra consulter M. Jampolsky, *Mont-Saint-Michel - Le labyrinthe de l'archange*, ARTE (2017) dont l'extrait pertinent est mis à disposition à http://jmfriedt.free.fr/Mont_Saint_Michel_extrait.mp4.
- [5] *Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz*, ITU (2015) à https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-I!!PDF-E.pdf
- [6] J.-M Friedt, *Introduction à l'analyseur de réseau : le NanoVNA pour la caractérisation spectrale de dispositifs radiofréquences*, Hackable (à paraître)
- [7] R. Feynman & al., *32-2 Les équations de Maxwell dans un diélectrique*, dans *Les cours de Feynman, électromagnétisme 2*, InterÉditions (1979)
- [8] V. Nitu, G. Lojewski, *Comparison of the average output power of GSM and UMTS mobile phones and the impact in exposure to electromagnetic waves*, UPB Scientific Bulletin C **76**(2), pp. 75–86 (2014)
- [9] *Electrical Conductivity of Aqueous Solutions*, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 91th Edition, p.5-71 (2010)
- [10] SYVEL, Bulletin 1 du 23 juillet 2011, à http://www.loire-estuaire.org/upload/espace/1/pj/44036_1597_BulletinSYVEL_001.pdf

- [11] SYVEL, Bulletin 8 du 30 juillet 2020, à http://www.loire-estuaire.org/upload/espace/1/pj/102152_4906_bulletinsyvel_8.pdf
- [12] K. Siever, R. Elsen, *Salt dome exploration by directional borehole radar wireline service*, IEEE International Conference on Ground Penetrating Radar (2010)
- [13] V.V. Bogorodsky, C.R. Bentley, P.E. Gudmandsen, *Radioglaciology*, D. Reidel Publishing (1985)
- [14] F. Tonolini & A. Fadel, *Networking across boundaries : enabling wireless communication through the water-air interface*, Proc. Conf. ACM Special Interest Group on Data Communication, 117–131 (2018) à <http://www.mit.edu/~fadel/papers/TARF-paper.pdf> et <https://www.youtube.com/watch?v=csYtAzDBk00>
- [15] J. Boitel, *À Louargat, ses antennes ne passent pas bien*, Ouest-France (Juillet 2014) à <https://www.ouest-france.fr/bretagne/louargat-ses-antennes-ne-passent-pas-bien-2734718> où une maire ne sait pas faire la différence entre une antenne émettrice et réceptrice, pour supposer un possible impact d'une onde radiofréquence sur l'eau.